

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Analýza betonu z hlediska použitých vstupních složek

Analysis of concrete in terms of the input components

Student:

Bc. Josef Hennig

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Mec

Ostrava 2015

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Anotace

Při aplikaci betonu na stavbách není, ve většině případů, dochováno složení pro případné hodnocení vlastností nebo diagnostiku. Aby bylo možné zjistit původní složení betonu, musíme znát jeho hmotnostní koncentrace cementu a kameniva.

Tato diplomová práce se zabývá analýzou betonu z hlediska použitých vstupních složek. Teoretická část diplomové práce popisuje historii betonu, jeho hlavní složky (cement, kamenivo, voda), druhy přísad a příměsí a popis laboratorních analýz.

Praktická část popisuje zpracování laboratorních analýz na připravených vzorcích betonu. Zkušební vzorky betonu měly známé složení. Pro potřeby práce bylo vyrobeno pět různých záměsí betonu. Byl ověřen také vliv karbonatace na výsledky analýzy.

Klíčová slova: beton, vysokopecní struska, vápenec, popílek, hmotnostní koncentrace cementu, hmotnostní koncentrace kameniva

Annotation

When using concrete for building any constructions, there isn't kept its composition for possible evaluation of properties or diagnosis in most cases. To find out original composition of the concrete, we have to know its weight-concentrations of cement and aggregate parts.

My thesis concerns with concrete analysis from the point of view of used input components.

Theoretic part of the thesis describes the history of the concrete, its main components (cement, aggregate, water), sorts of particular additives and admixtures and my laboratory analyses.

Practical part describes processing of lab-analyses on prepared concrete samples. Trial concrete samples had known composition. For the purposes of this thesis, five different concrete mixtures had been prepared.

The influence of the carbonatation onto the analysis's results was verified as well.

Key words: concrete, blast furnace slag, limestone, ash, the mass concentration of cement
the mass concentration of aggregate

Obsah diplomové práce:

Seznam použitého značení.....	9
1. Úvod.....	11
2. Beton	12
2.1 Historie betonu	12
2.2 Klasifikace betonu.....	14
2.1.1 Klasifikace dle stupně konzistence.....	14
2.2.2 klasifikace dle stupně vlivu prostředí.....	15
2.2.3 klasifikace dle třídy pevnosti v tlaku betonu	18
2.2.4 klasifikace dle objemové hmotnosti	18
2.3 Hlavní složky betonu	19
2.3.1 Kamenivo do betonu	20
2.3.1.1 Hutné kamenivo	22
2.3.1.2 Těžké kamenivo	24
2.3.2 Cement	26
2.3.3 Voda.....	31
2.3.4 Přísady.....	32
2.3.5 Příměsi.....	34
3. Experimentální část – analýza betonu z hlediska použitých vstupních složek.....	40
3.1 Popis zkoušených materiálů.....	40
3.2 Výroba zkušebních vzorků	42
3.3 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu	43
3.3.1 Stanovení geometrické objemové hmotnosti.....	43
3.3.2 Stanovení objemové hmotnosti metodou vážení nasyceného vzorku	44
3.3.3 Stanovení hustoty (objemové hmotnosti) betonu pyknometrickou metodou ..	46

3.3.4 Pórovitost a nasákavost	47
3.4 Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu	49
3.5 Stanovení pevnosti v tlaku	51
3.6 Příprava vzorků na laboratorní analýzy	52
3.7 Termická analýza.....	54
3.7.1 Termogravimetrie (TG).....	55
3.7.2 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC).....	57
3.8 Rentgenová fluorescenční spektrometrie (XRF).....	58
3.9 Stanovení hmotnosti složek betonu	59
3.10 Zahraniční normy	64
3.11 Výpočet CaO v betonu.....	70
4. Závěr.....	72
5. Seznam použitých zdrojů informací.....	73
6. Poděkování.....	76
Seznam obrázků	77
Seznam tabulek.....	78
Seznam grafů	79

Seznam použitého značení

A_c	$[\text{mm}^2]$	tlačená plocha zkoušeného tělesa
CaCO_3		uhličitan vápenatý
CaO		oxid vápenatý
Ca(OH)_2		hydroxid vápenatý
SiO_2		oxid křemičitý
Al_2O_3		oxid hlinitý
MgO		oxid hořečnatý
Fe_2O_3		oxid železitý
SO_3		oxid sírový
K_2O		oxid draselný
f_c	$[\text{N}]$	maximální tlaková síla působící v okamžiku porušení vzorku
$f_{c,\text{cyl}}$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	válcová pevnost betonu
$f_{c,\text{cube}}$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	krychelná pevnost betonu
V	$[\text{m}^3]$	objem zkoušeného vzorku
m_1	$[\text{kg}]$	hmotnost vysušeného vzorku
m_2	$[\text{kg}]$	hmotnost nasyceného vzorku váženého ve vodě
m_3	$[\text{kg}]$	hmotnost nasyceného vzorku váženého na vzduchu
m_v	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	hmotnost vody
m_c	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	hmotnost cementu
ρ	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	objemová hmotnost zkoušeného vzorku
ρ_{liq}	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	hustota kapaliny
M_H		hydraulický modul
M_s		silikátový modul
M_A		aluminátový modul
C_3S		trikalciumsilikát
C_2S		dikalciumsilikát
C_3A		trikalciumaluminát
C_4AF		tetrakalciumaluminátferit
v_L	$[\text{km}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost impulzu
L	$[\text{mm}]$	délka měřící základny
T	$[\text{s}]$	čas

PZ	[%]	zdánlivá pórovitost
PS	[%]	skutečná pórovitost
NV	[%]	nasákavost
μ_{ac}	[%]	v kyselině nerozložitelný hmotnostní podíl
$\psi_{c,b}$	[%]	hmotnostní podíl cementu v betonu
$\psi_{gr,b}$	[%]	hmotnostní podíl kameniva v betonu
$C_{c,b}$	[kg/m ³]	hmotnostní koncentrace cementu v betonu
$C_{gr,b}$	[kg/m ³]	hmotnostní koncentrace kameniva v betonu
Lc	[%]	stanovení kombinované vody
D_{SSD}	[kg/m ³]	objemová hmotnost nasyceného vzorku
D_{dry}	[kg/m ³]	objemová hmotnost suchého vzorku

1. Úvod

Kompozitní látka vznikající ztvrdnutím směsi základních složek se nazývá beton. Hlavní složky betonu jsou pojivo, plnivo a voda. Mezi nejčastěji používané pojivo patří cement. Štěrka, písek případně drtě jsou nejvíce používané materiály jako plnivo do betonu. V současné době je jeden z nejpoužívanějších materiálů. Skladbou a poměrem mísení jeho základních složek jsou ovlivňovány vlastnosti betonu. Ovlivnění jeho počátečních vlastností (obsah vzduchu, zpracovatelnost a čas tuhnutí) i konečných vlastností (pevnost, modul pružnosti, odolnost a trvanlivost) může být dosaženo přidáním vhodných přísad a příměsí. Takový beton získá zvláštní (neobvyklé) vlastnosti. Účinky okolního prostředí (např. teplota, vlhkost, zasolení) sekundárně ovlivňují konečné vlastnosti betonu. Některé vlastnosti ztvrdlého betonu jsou, z tohoto důvodu, časově proměnlivé [1].

Velmi dobrá pevnost v tlaku a lomová křehkost jsou vlastnosti nejvíce charakterizující beton a jeho použití na konstrukcích. Velkou nevýhodou nevyztuženého (prostého) betonu je malá pevnost v tahu, tahu za ohybu a smyku. Tyto vlastnosti dosahují pouze na desetinu hodnoty pevnosti v tlaku. Použití prostého betonu je omezeno jen na konstrukce s tlakovým napětím. Prostý beton nelze použít na ohýbané konstrukce. Beton namáhaný ohybem, lze použít na konstrukci pouze za předpokladu jeho vyztužení. Ohýbané konstrukce jsou rozděleny podle průřezu na část, kde vzniká tlakové napětí a část průřezu, kde vzniká tahové napětí. Výztuž je vždy umístěna v tažené části průřezu betonové konstrukce. Ocelové pruty s dostatečně vysokou pevností v tahu jsou nejčastěji používané na vyztužení. Konstrukce, kde spolupůsobí beton a ocelová výztuž nazýváme železobetonem případně předpjatým betonem. Předpjatý beton má výztuž, do které bylo vneseno předpětí.

V některých speciálních případech postačuje k vyztužení betonu použití rozptýlené výztuže ve formě vláken (vláknobeton), při použití ocelových vláken se potom nazývá drátkobeton [1].

Beton díky svým vlastnostem (tvarovatelnost, trvanlivost) má v podstatě použití ve všech oblastech stavebnictví. Kvalitní výroba a zpracování betonu zajistí jeho dlouhodobou statickou funkci. Beton současně chrání uloženou ocelovou výztuž proti korozi [1]. Základní norma pro beton je ČSN EN 206 [2].

2. Beton

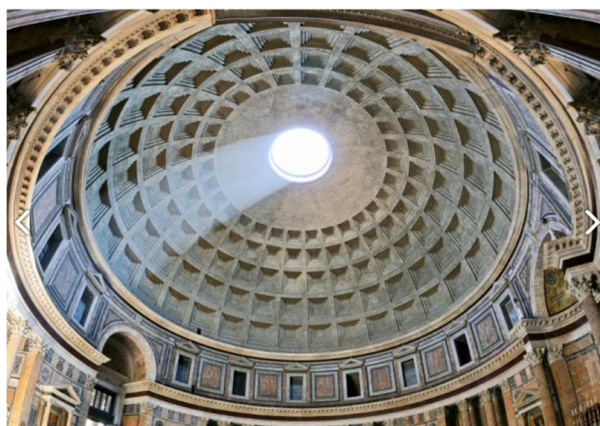
Technologie betonu je vědní a technická disciplína, která se zabývá složením, výrobou a vlastnostmi betonu. Minimální zatížení životního prostředí a minimální energetická náročnost jsou hlavním požadavkem na technologii betonu [10].

Tato kapitola popisuje historii, klasifikaci betonu a hlavní složky, ze kterých je beton složen (kamenivo, cement, voda, přísady a příměsi).

2.1 Historie betonu

Francouzský inženýr Belidor v roce 1753 zavedl v literatuře nové slovo betón, v překladu označující hrubou maltu. Spolu s latinským slovem betunium, které znamená kamenná malta, jsou tyto dvě historická slova označována za předky, které v té době označovaly stavební materiál připomínající dnešní beton.

První zmínky o použití umělého kamene pro stavbu sloupů v Egyptě se datují do roku 3600 před n. l. Z historických záznamů je známo, že ve středověku byl používán sopečný tuf, který měl podobné vlastnosti jako dnešní beton, tzn. po smíchání s vápnem tvrdnul i pod vodou. Římský Pantheon postavený v letech 120 – 125 n. l. je příkladem antické betonové stavby. Kopule je vyrobena z lehkého betonu a váží cca 5 000 tun. Její průměr je 49 m.

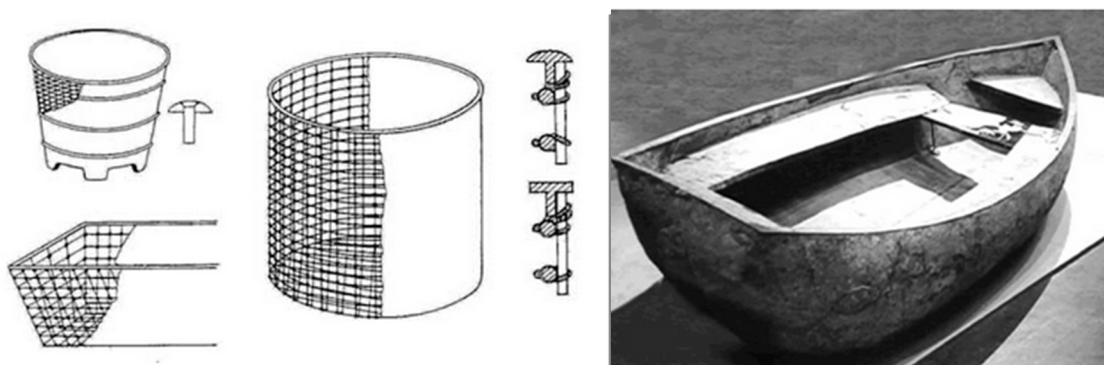


Obr. 1 – Kopule římského Pantheonu [22]

Další záznam o použití betonu při stavbě se datuje až do let 1756 – 1759, kdy byl beton použit J. Smeatonem pro opravu majáku. První kniha o betonu vyšla v roce 1791 a měla název Smeaton's Book.

Postupnou přeměnou hydraulických vápen se vyvíjel, v první polovině 19. století, portlandský cement dnešního typu. Toto období je historicky považováno za jeho vznik. Zedník J. Aspdin z Leedsu, v portlandském hrabství v Anglii, je považován za vynálezce cementu. Patent na výrobu „umělého kamene“ přihlašuje v roce 1824 a o rok později založil továrnu na výrobu „Portlandského cementu“.

Francouzský zahradník J. Monier je považován za vynálezce železobetonu, kdy v roce 1867 nejdříve vyrobil květináče a posléze nádrže vyztužované drátěnou sítí (Obr. 2). Již v roce 1850 byla provedena konstrukce z vyztuženého betonu a to člun (Obr. 2). Autorem návrhu byl J. L. Lambot.



Obr. 2 - Vyztužené květináče J. Moniéra, vyztužený člun J. L. Lambota [23]

Největší zásluhu na rozvoji betonového stavitelství na přelomu 19. a 20. století měli F. Hennebique (výhradně stavby ze železobetonu) a E. Freyssinet (předpjatý beton). Patent na předpjatý beton v roce 1886 získal Jackson.

Železobeton se u nás prosazoval velice zvolna, protože zde měli dominantní postavení výrobci ocelových mostů a byly zde přísné stavební předpisy nesprávně uplatňované pro dimenzování betonových konstrukcí. I přes tyto problémy si od počátku 20. století beton dobývá své místo v Čechách. První publikace o betonu (K. Herzán) u nás byla vydána v roce 1904. Technologie betonu se stává vědní disciplínou. Nejvíce se o to zasloužili první profesori F. Klokner, S. Bechyně, B. Hacar a K. Hruban.

2.2 Klasifikace betonu

Rozdělení betonů podle různých kritérií a hledisek se nazývá klasifikace betonu. Beton je zařazován do jednotlivých skupin, tříd a druhů.

Norma ČSN EN 206, která nahradila ČSN EN 206-1, je vodítkem při základní klasifikaci betonu.

Norma ČSN EN 206 klasifikuje beton podle čtyř nejčastějších kritérií [2]:

1. klasifikace dle stupně konzistence,
2. klasifikace dle stupně vlivu prostředí,
3. klasifikace dle třídy pevnosti v tlaku,
4. klasifikace dle třídy objemové hmotnosti (pro lehký beton).

Beton podle objemové hmotnosti dělíme na [1]:

- lehký ($\rho < 2000 \text{ kg.m}^{-3}$),
- obyčejný ($\rho = 2000 - 2600 \text{ kg.m}^{-3}$),
- těžký ($> 2600 \text{ kg.m}^{-3}$).

2.1.1 Klasifikace dle stupně konzistence

Konzistence betonu je prováděna na vzorku čerstvého betonu. Zkoušky stanovení konzistence čerstvého betonu jsou následující [1]:

- a) klasifikace podle sednutí kužele,
- b) klasifikace podle Vebe,
- c) klasifikace podle zhutnitelnosti,
- d) klasifikace podle rozlití.

Konzistence zjištěny různými metodami nejsou navzájem srovnatelné ani převoditelné.

Stupeň	Sednutí [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	≥ 220

Tabulka č. 1 – Klasifikace podle sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [3]

Stupeň	Vebe čas [mm]
V0	≥ 31
V1	30 až 21
V2	20 až 11
V3	10 až 6
V4	5 až 3

Tabulka č. 2 – Klasifikace podle Vebe dle ČSN 12350-3 [4]

Stupeň	Stupeň zhutnitelnosti
C0	$\geq 1,46$
C1	1,45 až 1,26
C2	1,25 až 1,11
C3	1,10 až 1,04

Tabulka č. 3 – Klasifikace podle zhutnitelnosti dle ČSN EN 12350-4 [5]

Stupeň	Průměr rozlití [mm]
F1	≤ 340
F2	350 až 410
F3	420 až 480
F4	490 až 550
F5	560 až 620
F6	≥ 630

Tabulka č. 4 – Klasifikace podle rozlití dle ČSN 12350-5 [6]

2.2.2 klasifikace dle stupně vlivu prostředí

Základním způsobem klasifikace betonu je rozdělení podle stupně vlivu prostředí (dříve uváděné podle agresivity prostředí). V tabulce č. 1 jsou uvedené možné druhy okolního prostředí, kterým může být beton vystaven (stupeň chemického a fyzikálního působení). Na beton vždy nepůsobí pouze jeden vliv prostředí. Jestliže současně působí dva a více vlivů prostředí, tyto vlivy se kombinují. Konečnou klasifikaci stupně vlivu prostředí může tato kombinace ovlivnit zařazením betonu do vyšší kategorie stupně odolnosti.

Označení stupně	Popis prostředí	Informativní příklady výskytu stupně prostředí
1 Bez nebezpečí koroze nebo narušení		
X0	Pro beton bez výztuže nebo zabudovaných kovových vložek. Všechny vlivy s výjimkou zmrazování a rozmrazování, obrusu nebo chemicky agresivního prostředí.	Interiér budov s velmi nízkou vlhkostí
	pro beton s výztuží nebo zabudovanými kovovými vložkami: velmi suché	
2 Koroze vlivem karbonatace		
Pokud je beton obsahující výztuž nebo jiné zabudované kovové vložky vystaven ovzduší a vlhkosti, pak se stupeň vlivu prostředí určí následovně:		
XC1	Suché nebo trvalé mokré.	Beton v interiéru s nízkou vlhkostí vzduchu;
		Beton trvale ponořený ve vodě.
XC2	Mokré, zřídka suché.	Povrch betonu vystavený dlouhodobému působení vody;
		Většina základů.
XC3	Středně mokré, vlhké.	Beton v interiérech se střední nebo vysokou vlhkostí,
		Venkovní beton chráněný proti dešti.
XC4	Střídavě mokré a suché.	Povrchy betonu ve styku s vodou, které nejsou zahrnuty ve stupni vlivu prostředí XC2.
3 Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody		
Pokud přichází beton, obsahující výztuž nebo jiné zabudované kovové vložky, do styku s vodou obsahující chloridy, včetně rozmrazovacích solí, ze zdrojů jiných než z mořské vody, určí se vliv prostředí následovně:		
XD1	Středně mokré, vlhké.	Betonové povrchy vystavené chloridům rozptýleným ve vzduchu.
XD2	Mokré, občas suché.	Plavecké bazény. Beton vystavený působení průmyslových vod obsahující chloridy.
XD3	Střídavě mokré a suché.	Části mostů vystavené postřikům obsahujícím chloridy. Vozovky, betonové povrch parkovišť.

4 Koroze vlivem chloridů z mořské vody		
Pokud přichází beton, obsahující výztuž nebo jiné zabudované kovové vložky, do styku s chloridy z mořské vody nebo slaným vzduchem z mořské vody musí být vliv určen prostředím následovně:		
XS1	Vystavené slanému vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou.	Stavby v blízkosti mořského pobřeží nebo na pobřeží.
XS2	Trvale ponořené ve vodě.	Části staveb v moři.
XS3	Smáčený a ostříkovaný přílivem.	Části staveb v moři.
5 Působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich		
Pokud je mokřý beton vystaven významnému působení střídavého mrazu a rozmrazování, určí se vliv prostředí následovně:		
XF1	Mírně nasycené vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Svislé betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF2	Mírně nasycené vodou s rozmrazovacími prostředky.	Svislé betonové povrchy silničních konstrukcí vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům rozptýleným ve vzduchu.
XF3	Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Vodorovné betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF4	Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou.	Vozovky a mostovky vystavené rozmrazovacím prostředkům.
		Betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostředky a mrazu.
		Omývaná část staveb v moři vystavená mrazu
6 Chemické působení		
Pokud je beton vystaven chemickému působení rostlé zeminy a podzemní vody, určí se vliv prostředí následovně:		
XA1	Slabě agresivní chemické prostředí	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě
XA2	Středně agresivní chemické prostředí	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě
XA3	Vysoce agresivní chemické prostředí	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě

Tabulka č. 5 – Klasifikace betonu dle stupně vlivu prostředí [2]

2.2.3 klasifikace dle třídy pevnosti v tlaku betonu

Pevnostní třídy jsou základním prvkem pro rozdělení betonu podle pevnosti v tlaku. Pevnost v tlaku se provádí na válcích (válcová pevnost) průměru 150 mm a výšky 300 mm nebo na krychlích (krychelná pevnost) o hraně 150 mm. Válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ se zapisuje před lomítko. Krychlená pevnost $f_{ck,cube}$ je zapisována za lomítko. Hodnoty válcové a krychlené pevnosti jsou zapisovány v charakteristických hodnotách a v jednotkách MPa. Stáří betonu potřebné pro určení pevnosti v tlaku je 28 dnů.

Pevnostní třídy betonu v tlaku pro obyčejný a těžký beton			Pevnostní třídy betonu v tlaku pro lehký beton		
Pevnostní třída v tlaku	$f_{ck, cyl}$ (válec) N/mm ²	$f_{ck, cube}$ (krychle) N/mm ²	Třída pevnosti	$f_{ck, cyl}$ [N/mm ²]	$f_{ck, cube}$ [N/mm ²]
C -/5	-	5	LC 8/9	8	9
C -/7,5	-	7,5	LC 12/13	12	13
C 8/10	8	10	LC 16/18	16	18
C 12/15	12	15	LC 20/22	20	22
C 16/20	16	20	LC 25/28	25	28
C 20/25	20	25	LC 30/33	30	33
C 25/30	25	30	LC 35/38	35	38
C 30/37	30	37	LC 40/44	40	44
C 35/45	35	45	LC 45/50	45	50
C 40/50	40	50	LC 50/55	50	55
C 45/55	45	55	LC 60/66	60	66
C 50/60	50	60	LC 70/77	70	77
C 55/67	55	67	LC 80/88	80	88
C 60/75	60	75			
C 70/85	70	85			
C 80/95	80	95			
C 90/105	90	105			
C 100/115	100	115			

Tabulka č. 6 – Třídy pevnosti v tlaku obyčejného, těžkého a lehkého betonu [13]

2.2.4 klasifikace dle objemové hmotnosti

Rozdělení betonu podle třídy objemové hmotnosti platí jen pro lehké betony pevnostních tříd LC 8/9 až LC 80/88 a odvozuje se z hodnoty objemové hmotnosti stanovené v suchém stavu [1].

Třída objemové hmotnosti	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Rozsah objemové hmotnosti zkoušené podle EN 12390-7	≥ 800 a ≤ 1 000	> 1 000 a ≤ 1 200	> 1 200 a ≤ 1 400	> 1 400 a ≤ 1 600	> 1 600 a ≤ 1 800	> 1 800 a ≤ 2 000
kg/m ³						

Tabulka č. 7 – Klasifikace lehkého betonu podle objemové hmotnosti [2]

Rozdělení betonu podle vyztužení v konstrukci [1]:

- prostý beton (bez výztuže),
- železobeton (kombinace betonu a ocelových prutů),
- předpjatý beton (předepnutá ocelová výztuž),
- vláknobeton.

Rozdělení betonu podle statické funkce [1]:

- se statickou funkcí (konstrukční),
- bez statické funkce (výplňový).

Rozdělení betonu podle funkce v konstrukci [1]:

- vodostavební,
- konstrukčněizolační,
- silniční,
- masivní,
- dekorační.

2.3 Hlavní složky betonu

Cement, kamenivo a voda tvoří hlavní složky betonu. Přísady a příměsi patří mezi složky doplňkové, které ovlivňují vlastnosti betonu.

Škodlivé látky, které by mohly ovlivnit životnost betonu, musí být obsaženy v co nejmenším množství. Nejlépe pokud by se v betonu vůbec nevyskytovaly. Složení a typ betonu se odvíjí od účelu, ke kterému je zhotoven. Surovina použitá do betonu nemusí vždy vyhovovat každému složení a typu betonu. Pro výrobu betonu vyhovujícího ČSN EN 206 je dovoleno použití jen těch složek betonu, u kterých byla prokázána vhodnost pro specifikované použití [1].

2.3.1 Kamenivo do betonu

Kamenivo je zrnitý materiál s velikostí zrna do 125 mm. Pevná kostra betonu, která zaujímá 75 – 80 % objemu betonu, je tvořená použitým kamenivem. Hlavním požadavkem na kostru betonu je minimální mezerovitost. Vhodným poměrem různě velkých zrn kameniva je tento požadavek zajištěn. Výroba malt a betonu není možná bez přítomnosti kameniva. Kamenivo v těchto materiálech slouží jako plnivo. Další použití kameniva je především v silničním a železničním stavitelství, kdy tvoří zhutněné vrstvy násypů a kolejových loží.

Kamenivo je děleno podle různých kritérií [12]:

- a) původ kameniva,
- b) objemová hmotnost,
- c) velikost zrn.

a) rozdělení kameniva podle původu [12]:

- přírodní (těžené, drcené, předrcené),
- umělé,
- recyklované.

b) rozdělení kameniva podle objemové hmotnosti [12]:

- pórovité ($\rho < 2000 \text{ kg.m}^{-3}$),
- hutné ($\rho = 2000 - 3000 \text{ kg.m}^{-3}$),
- těžké ($\rho > 3000 \text{ kg.m}^{-3}$).

c) rozdělení kameniva podle velikosti zrn [12]:

- drobné (zrna do 4 mm),
- hrubé (zrna 4 – 125 mm),
- filer (kamenná moučka) zrna pod 0,063 mm.

Kamenivo	Velikost	Propad v procentech hmotnosti					Kategorie G^d
		2D	1,4 D	D	d	d/2	
Hrubé	$D/d \leq 2$ nebo $D \leq 11,2 \text{ mm}$	100 100	98 až 100 98 až 100	85 až 99 80 až 99	0 až 20 0 až 20	0 až 5 0 až 5	$G_C 85/20$ $G_C 80/20$
Hrubé	$D/d > 2$ nebo $D > 11,2 \text{ mm}$	100	98 až 100	90 až 99	0 až 15	0 až 5	$G_C 90/15$
Drobné	$D \leq 4 \text{ mm}$ a $d = 0$	100	95 až 100	85 až 99	–	–	$G_F 85$
Těžené přírodní 0/8	$D = 8 \text{ mm}$ a $d = 0$	100	98 až 100	90 až 99	–	–	$G_{NG} 90$
Směs kameniva	$D \leq 45 \text{ mm}$ a $d = 0$	100	98 až 100	90 až 99	–	–	$G_A 90$
		100	98 až 100	85 až 99	–	–	$G_A 85$

Tabulka č. 8 – Požadavky na zrnitost kameniva dle normy ČSN EN 12620 [11]

2.3.1.1 Pórovité kamenivo

Kamenivo s objemovou hmotností do 2000 kg.m^{-3} nazýváme pórovitým kamenivem. Hlavní oblastí použití pórovitého kameniva je výroba lehkých malt a betonů s tepelněizolačními účinky.

Pórovité kamenivo rozdělujeme:

- přírodní,
- umělé - z přírodních zdrojů,
- z průmyslových odpadů.

Přírodní pórovité kamenivo

Na území České republiky se vyskytují lehké přírodní horniny, jako jsou tufy, tufity, křemelina, čedičové lávy. Tyto horniny jsou používány pro výrobu přírodního pórovitého kameniva. Nevýhodou těchto kameniv je kolísavá objemová hmotnost, nestejnoměrnost vlastností, otevřená pórovitost (nasákavost). Jelikož je kamenivo vyráběno drcením hornin, obsahují také vyšší procento prachových podílů.

Pórovité kamenivo z přírodních zdrojů

Žíháním granulí jílových hornin v rotačních pecích lze vyrobit pórovité kamenivo. U nás je vyráběno pórovité kamenivo keramzit. Keramzit je charakteristický svými kulovitými zrny a uzavřeným slinutým povrchem. Je zdravotně nezávadný. Vzhledem k uzavřenému povrchu má keramzit nízkou nasákavost. Další kladné vlastnosti jsou pevnost, tepelně a zvukově izolační schopnosti, odolnost vůči kyselinám a louhům. Používá se pro izolační a výplňové zásypy a pokladní vrstvy. Hlavní skupinu použití tvoří lehké betony. Z lehkých betonů s keramzitem jsou vyráběny dílce a tvarovky, monolitické konstrukce. Mezi další kameniva, která jsou používána ve stavebnictví, patří expandovaný perlit, vermikulit a expandit.



Obr. 3 – Pórovité kamenivo – Keramzit [14]

Pórovité kamenivo z průmyslových odpadů

Nejvíce používaným pórovitým kamenivem z průmyslových odpadů je zpěněná struska, škvára, cihelná drť a popílek.

Zpěněná struska: Prudkým zchlazením žhavé tekuté strusky vzniká zpěněná struska. Zpěněná struska se nepoužívá z důvodu kolísavé jakosti. Nezpěněná struska se využívá jako hutné kamenivo. Struskové kamenivo je u nás běžně dostupné.

Škvára: Spalováním pevných paliv v roštových pecích vzniká odpad, který se nazývá škvára. Použití škváry je limitováno maximálním obsahem nespálených zbytků (do 10 %). Nevýhodou škváry je objemová nestálost, kterou mohou způsobovat volné oxidy CaO a MgO.

Cihelná drť: Drcením cihelné suti vzniká cihelná drť. Nerovnoměrná jakost a třídění suti od ostatních hmot patří mezi nevýhody cihelné suti.

2.3.1.2 Hutné kamenivo

Nejvýznamnější složkou běžných betonů a malt je hutné kamenivo, které má objemovou hmotnost 2000 – 3000 kg.m⁻³. Rozlišujeme dva způsoby dobývání hutného kameniva:

- těžením,
- drcením.

Těžba těžného kameniva je možná pod vodní hladinou (těžba z vody) nebo na zemském povrchu (suchá těžba). Nejčastější stroje, používané pro těžbu z vody, jsou drapákové, korečkové nebo sací bagry.

Drcené kamenivo je získáváno povrchovou těžbou v lomech. Pomocí odstřelů je hornina oddělována od lomové stěny. Dnes jsou nejvíce využívány clonové odstřely. Hydraulickými kladivy jsou zmenšovány nadměrné kusy horniny.



Obr. 4 - Těžba hutného kameniva – z vody (vlevo), clonovým odstřelem (vpravo) [12]

Nejčastěji používané druhy hornin pro obyčejné betony jsou uvedené v tabulce č. 9.

Hornina	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tvrdost dle Mohse	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Nasákavost [%]
Vyvřeliny					
žula	2600–2800	6–7	120–240	10–35	0,2–1,2
diorit	2700–3000	6–7	135–215	20–40	0,2–0,7
gabbro	2800–3100	6–7	150–225	25–60	0,2–0,5
syenit	2500–2900	6–7	150–200	10–20	0,2–0,5
čedič	2050–3000	6	250–400	15–25	0,1–0,3
trachyt	2400–2900	6–7	60–70		1–2
diabas	2800–2980	6	120–220	20–45	0,1–0,8
porfyr, porfyrít	2550–2650	6–7	70–210	15–30	0,2–1,5
Vrstevnaté horniny					
pískovec – SiO ₂	2000–2400	proměnlivá	30–80	3,8	4,0–8,5
vápenec	2600–2850	3	40–180	10–25	0,2–0,6
dolomit	2650–2850	3,5	100–200	12–25	0,2–0,6
břidlice	2600–2750	7	100–190	30–100	0,3–1,5
Metamorfované horniny					
rula	2650–2750	6–7	120–250	24–50	0,1–1,2
křemenec	2500–2700	7	300		0,5
amfibolit	2700–3100	6	170–280		0,1–0,4
mramor	2700–2800	3	75–145	12–26	0,2–1,0
serpentin	2500–2850	3–4	60–140	10–23	0,1–2,0

Tabulka č. 9 – Druhy hornin pro obyčejné betony [10]

Hornina	Mineralogické složení	Chemické složení
Žula	Křemen	60 % SiO ₂
	Ortoklas	15 % Al ₂ O ₃
	Albit	4 % K ₂ O
	Slídy	zbytek Na, Ca, Fe
Čedič	Plagioklas	55 % SiO ₂
	Pyroxen	19 % Al ₂ O ₃
	Olivín	10 % Fe ₂ O ₃
		8 % CaO
Vápenec	Kalcit	90 % CaCO ₃
Droba	Křemen	70 % SiO ₂
	Živec	14 % Al ₂ O ₃
	Jílovité složky	3 % Fe ₂ O ₃
		3 % K ₂ O

Tabulka č. 10 - Přehled mineralogického a chemického složení vybraných hornin použitých do betonů

Škodlivé látky v kamenivu

Použití kameniva do betonu závisí na jeho vlastnostech. Mineralogické složení zrn kameniva nejvíce ovlivňuje chemické reakce probíhající mezi cementovým tmelem a kamenivem. Škodlivé látky, obsažené v kamenivu, mění vlastnosti a trvanlivost betonu (vnitřní pnutí, tuhnutí a tvrdnutí cementového tmele).

Cukr, obsažený v humusovitých materiálech a látkách, může nepříznivě působit na rychlost hydratace cementu. Mění dobu tuhnutí a tvrdnutí. Porušení betonu rozpínáním způsobují sírany. Koroze kovových částí betonu je způsobena přítomností chloridů v kamenivu. Chloridové ionty, v kamenivu, které je z českých zdrojů, jsou obsaženy ve velmi malém množství a neovlivňují kovové části betonu.

Přehled látek, které v kamenivu, škodí betonu [1;15]:

- jemné částice (do velikosti 0,063 mm, obsah max. 3%),
- tvarově nevhodná zrna (tvarový index zrn $L/E > 3$),
- humusovité látky (zkouška pomocí NaOH),
- organické látky, které nabývají na objemu (dřevo),
- zrna s nízkou mrazuvzdorností a trvanlivostí,
- látky ovlivňující tvrdnutí,
- látky obsahující síru,
- látky způsobující korozi výztuže (halogenidy),
- látky obsahující reaktivní formy SiO_2 ,
- kamenivo ze zbytků čerstvého betonu a malt.

2.3.1.3 Těžké kamenivo

Těžké kamenivo má objemovou hmotnost větší než 3000 kg.m^{-3} . Těžké kamenivo se přidává do konstrukcí z těžkých betonů. Oblast jaderné techniky, místnosti s výskytem radioaktivního a rentgenového záření, jsou hlavní oblasti použití těžkého betonu. Vzájemná kombinace těžkých kameniv do betonu je možná. Železný odpad nebo ocelové broky jsou často kombinovány s kamenivem.



Obr. 5 - Těžké kamenivo – Baryt [12]

Základní požadavky na kamenivo do těžkých betonů jsou:

- zaručení pravidelné křivky zrnitosti, objemové hmotnosti, chemického složení, obsah krystalicky vázané vody,
- charakter kameniva neovlivňuje hutnost a pevnost betonu,
- odolnost kameniva proti ohrusu,
- povrch kameniva nesnižuje přídržnost v betonu a maltě,
- kamenivo neobsahuje látky nevhodné pro beton a ocel,
- pevnost v tlaku minimálně 80 MPa.

Nejčastěji používané kameniva jsou magnetit, limonit, baryt a korund. Jejich vlastnosti a chemické složení jsou uvedené, spolu s dalšími druhy kameniva, v tabulce č. 11 [1].

Hmota	Chemické složení	Objemová hmotnost (kg.m ⁻³)	Specifická absorpce (cm ² .g ⁻¹)	
			rychlé neutrony	γ-záření 3 MeV
korund	Al ₂ O ₃	3 600	0,0330	0,0365
baryt	BaSO ₄	4 300	0,0236	0,0363
ferofosfor	FenP	6 400	0,0230	0,0359
magnetit	Fe ₂ O ₃	4 600	0,0258	0,0359
limonit	Fe ₂ O ₃ + nH ₂ O	3 700	0,0372	0,0362
železo	Fe	7 800	0,0214	0,0359
olovo	Pb	11 300	0,0103	0,0413
křemen	SiO ₂	2 600	0,0328	0,0362
voda	H ₂ O	1 000	0,1 – 0,1340	0,0396

Tabulka č. 11 – Specifická absorpce záření některých kameniv [1]

2.3.2 Cement

Nejčastěji, v dnešní době, používané pojivo do betonu je cement. Jedná se o anorganickou látku, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne. Proces tuhnutí a tvrdnutí probíhá i pod vodou. Látky, které tuhnou i tvrdnou pod vodou, bez přístupu vzduchu, nazýváme hydraulická pojiva. Hydratace vápenatých silikátů a aluminátů je podnětem pro hydraulické tvrdnutí cementu.

Výroba cementu

Výroba cementu probíhá v současnosti v rotačních pecích. Dříve probíhala i v šachtových pecích. Základní surovinou pro výrobu cementu je slínek. Surovina pro výrobu slínku je směs vápence, jílu, hlín a dalších oxidů (Fe_2O_3 a MgO). V rotační peci, která je dlouhá až 100 m, je surovinová směs postupně ohřívána až do teploty 1300 – 1400°C. Při této teplotě dochází k procesu slinování. Původně práškovitá násada je spékána do hrudek a vzniká slínek, meziprodukt při výrobě cementu.

Zejména křemičitany (silikáty) a hlinitany (alumináty) vápenaté obsahuje slínek. Po částečném vychladnutí se slínek drtí. Ve skladovacích silech je umístěn, aby vychladl.

Jednosložkový cement vzniká mletím slínku společně s přísadou 2 – 6 % sádrovce. Sádrovec i anhydrit lze použít v cementu jako regulátor rychlosti tuhnutí. Další vedlejší přísady mohou být přidávány do cementu, pokud nepřesahují 1% hmotnosti cementu.

Mineralogické složení portlandského cementu

Vlastnosti cementu jsou nejvíce ovlivňovány čtyřmi sloučeninami slínku. Tyto sloučeniny se nazývají slínkové minerály. Všechny prvky pro tvorbu slínkových minerálů se nacházejí ve formě oxidů.

Základní slínkové minerály:

- Trikalciumpsilikát,
- Dikalciumpsilikát,
- Trikalciumaluminát,
- Tetraalkiumaluminátferit.

Trikalciumsilikát (Alit)

- chemický vzorec $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)
- obsah ve slínku cca 65 - 80 %
- podílí se na počátečních pevnostech betonu
- má vysoký vývin hydratačního tepla

Dikalciumsilikát (Belit)

- chemický vzorec $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)
- obsah ve slínku 5 – 30 %
- menší vývin hydratačního tepla
- podílí se na konečných pevnostech
- nejčastěji zastoupen ve fázi $\beta\text{-C}_2\text{S}$

Trikalciumaluminát

- chemický vzorec $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
- obsah ve slínku 5 – 15 %
- největší vývin hydratačního tepla, ale nepodílí se na konečných pevnostech
- zpracování možné jen s pomocí sádrovce (regulátoru tuhnutí)
- málo odolný vůči agresivnímu prostředí
- součást spojovací hmoty

Tetrakalciumaluminátferit (Celit)

- chemický vzorec $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)
- obsah ve slínku 3 – 10 %
- pomalejší nárůst pevností
- vysoká odolnost vůči agresivnímu prostředí
- součást spojovací hmoty

Vedlejší složky slínku:

- Volný oxid vápenatý (CaO) – obsah 0,3 – 3 %,
- Volný oxid hořečnatý (MgO) – obsah max. 6%.

Volné CaO a MgO neochotně hydratují (až po dlouhé době) a jejich hydratace způsobuje rozpínání a možný vznik trhlin v betonu.

Chemické složení portlandského cementu

Chemické složení cementu je vyjádření procentuálního zastoupení hlavních a vedlejších oxidů. Hlavní oxidy jsou oxid vápenatý (CaO), oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3), oxid železitý (Fe_2O_3).

Vedlejší oxidy jsou oxid hořečnatý (MgO), oxid draselný (K_2O), oxid sodný (Na_2O), oxid sírový (SO_3).

Chemické složení cementu [16]:

CaO 56 – 69 %,

SiO_2 16 - 26 %,

Al_2O_3 4 – 8 %,

Fe_2O_3 1 - 8 %,

MgO 0 – 6 %,

$\text{K}_2\text{O}; \text{Na}_2\text{O}$ max. 1,5 %,

SO_3 0,5 – 3,5 %,

Volné CaO 0,3 – 3 %,

Poměr hlavních oxidů ve vstupních surovinách vyjadřují moduly. Značení oxidů v rovnicích je následující $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\text{C} = \text{CaO}$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{F} = \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Hydraulický modul:

$$M_H = \frac{C}{S+A+F} \quad (1)$$

Hodnota hydraulického modulu se pohybuje v rozmezí 1,9 – 2,2. Pokud má cement hodnotu hydraulického modulu $M_H > 2,4$, tvorba slínkových minerálů C_3S a C_3A je vyšší. Tyto minerály vykazují nižší odolnost proti agresivním látkám, ale na druhou stranu mají vyšší vývin hydratačního tepla a vyšší počáteční pevnosti. Nižší pevnosti vykazují cementy s hydraulickým modulem $M_H < 1,7$.

Silikátový modul:

$$M_S = \frac{S}{A+F} \quad (2)$$

Hodnota silikátového modulu je v rozmezí 2,4 – 2,7. Cementy s vyšším silikátovým modulem M_S mají pomalejší tuhnutí, ale lépe odolávají agresivnímu prostředí.

Aluminátový modul:

$$M_A = \frac{A}{F} \quad (3)$$

Hodnota aluminátového modulu je v rozmezí 1,5 – 2,5. Hodnotu aluminátového modulu $M_A > 8$ mají bílé cementy.

Stupeň sycení vápnem:

$$S_{LP} = \frac{C}{2,8 \cdot C + 1,18 \cdot A + 0,65 \cdot F} \quad (4)$$

Stupeň sycení vápnem dle Lea-Parkera má hodnotu 0,87 – 0,92. Tato hodnota udává, kolik CaO zreagovalo na slínkové minerály. Pokud stupeň sycení vápen S_{LP} nabývá hodnoty 1, zreagovalo všechno CaO na slínkové minerály. Ve slínku je obsaženo více C_3S , C_3A pokud S_{LP} nabývá vyšších hodnot.

Základní druhy cementu

Rozdělení cementu podle třídy normalizované pevnosti (= pevnost v tlaku v MPa) [10]:

- 32,5;
- 42,5;
- 52,5.

Základní druhy cementů podle ČSN EN 197-1 [17]:

- **CEM I** – Portlandský cement,
- **CEM II** – Portlandský cement směsný,
- **CEM III** – Vysokopecní cement,
- **CEM IV** – Pucolánový cement,
- **CEM V** – Směsný cement.

Složky ve vícesložkových cementech dle ČSN EN 197-1 [7]:

- Portlandský slínek (K),
- Granulovaná vysokopecní struska (S),
- Pucolány (P, Q),
- Křemičitý popílek (V),
- Vápenatý popílek (W),
- Kalcinovaná břidlice (T),
- Křemičitý úlet (D),
- Vápenec (L, LL).

Druh cem.	Název cementu	Označení cem.	Slínek (K)	Vysokopecní struska (S)	Křemičitý úlet (D) ³⁾	Pucolán přírodní (P)	Pucolán průmyslový (Q) ⁴⁾	Popílek křemičitý (V)	Popílek vápenatý (W)	Kalcinovaná břidlice (T)	Vápenec (L)	Doplňující složky ²⁾
I	Portlandský cement	I	95 – 100	~	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5
II	Portlandský struskový cement	II/A-S	80 – 94	6 – 20	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-S	65 – 79	21 – 35	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	II/A-D	90 – 94	~	6 – 10	~	~	~	~	~	~	0 – 5
	Portlandský pucolánový cement	II/A-P	80 – 94	~	~	6 – 20	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-P	65 – 79	~	~	21 – 35	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/A-Q	80 – 94	~	~	~	6 – 20	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-Q	65 – 79	~	~	~	21 – 35	~	~	~	~	0 – 5
	Portlandský popílkový cement	II/A-V	80 – 94	~	~	~	~	6 – 20	~	~	~	0 – 5
		II/B-V	65 – 79	~	~	~	~	21 – 35	~	~	~	0 – 5
		II/A-W	80 – 94	~	~	~	~	~	6 – 20	~	~	0 – 5
		II/B-W	65 – 79	~	~	~	~	~	21 – 35	~	~	0 – 5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	II/A-T	80 – 94	~	~	~	~	~	~	6 – 20	~	0 – 5
		II/B-T	65 – 79	~	~	~	~	~	~	21 – 35	~	0 – 5
	Portlandský cement s vápencem	II/A-L	80 – 94	~	~	~	~	~	~	~	6 – 20	0 – 5
		II/B-L	65 – 79	~	~	~	~	~	~	~	21 – 35	0 – 5
V	Portlandský směsný cement	II/A-M	80 – 94	6 – 20 ⁵⁾								
		II/B-M	65 – 79	21 – 35 ⁵⁾								
		III/A	35 – 64	36 – 65	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5
III	Vysokopecní cement	III/B	20 – 34	66 – 80	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5
		III/C	5 – 19	81 – 95	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5
IV	Pucolánový cement	IV/A	65 – 89	~	11 – 35				~	~	~	0 – 5
		IV/B	45 – 64	~	36 – 55				~	~	~	0 – 5
V	Směsný cement	V/A	40 – 64	18 – 30	~	18 – 30			~	~	~	0 – 5
		V/B	20 – 39	30 – 50	~	30 – 50			~	~	~	0 – 5

¹⁾ Hodnoty v tabulkách se vztahují na hlavní a doplňující složky cementu bez síranu vápenatého a přísad

²⁾ Jako doplňující složky mohou být použita plniva nebo jedna či více látek, používaných jako hlavní složky, pokud v cementu nejsou jako hlavní složky použity

³⁾ Obsah křemičitého úletu je limitován do 10 %

⁴⁾ Obsah jiných strusek než vysokopecní strusky je limitován do 15 %

⁵⁾ Obsah plniva je limitován do 5 %

Tabulka č. 12 – Druhy cementů a jejich složení podle ČSN EN 197-1 [7]

2.3.3 Voda

Voda v betonu plní dvě funkce [10]:

- hydratační,
- reologickou.

Díky přítomnosti vody, která má hydratační funkci, dochází k chemickým a fyzikálním pochodům, při který beton tuhne a tvrdne. Tento proces se nazývá hydratace. Pro zdárný průběh hydratace je potřebné minimální množství vody, které odpovídá asi 23 – 25 % hmotnosti cementu.

Ve spojení se složkami betonu je voda schopna napomáhat vytvoření tvárného čerstvého betonu. Koheze je zajišťována kapilárními silami a plasticita čerstvého betonu viskozitou. Voda dávkovaná při výrobě čerstvého betonu nazýváme vodou záměsovou. Voda, která je dodávána po zatuhnutí betonu po několik dnů pro udržení betonu ve vlhkém prostředí, je nazývána vodou ošetřovací. Norma ČSN EN 1008 je závazná pro záměsovou vodu. Pitná voda vždy vyhovuje požadavkům uvedeným v normě ČSN EN 1008 [9].

Vlastnost	Použitelná bez zkoušky pevnosti v tlaku	Podmíněně použitelná, když pevnost v tlaku vyhovuje
Barva	Bleděžlutá nebo světlejší	Tmavá nebo barevná (červená, zelená, modrá)
Olej a tuk	Pouze stopa	Olejový film nebo emulze
Detergenty	Nízký stupeň pěny, stálá do 2 minut	Hodně pěny, která je stálá nad 2 minuty
Suspendované látky	$< 4 \text{ cm}^3$	$> 4 \text{ cm}^3$
Zápach	Žádný až slabý	Výrazný (H_2S)
pH	> 4	< 4
Obsah chloridů (Cl^-): Prostý beton Železobeton Předpjatý beton	$< 4\,500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ $< 2\,000 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ $< 600 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	$> 4\,500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Sířany (SO_4^{2-})	$< 2\,000 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	$> 2\,000 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Glukóza +	$< 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ +	$> 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ +
Sacharóza	$< 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	$> 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Fosforečnany (P_2O_5)	$< 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	$> 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Dusičnany (NO_3^-)	$< 500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	$> 500 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Zinek (Zn^{2+})	$< 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	$> 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Sulfidy (S^{2-})	$< 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	$> 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Olovo (Pb^{2+})	$< 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$< 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	
Humínové látky	Světležlutá nebo světlejší po přidání NaOH	Tmavší než světležlutá

Tabulka č. 13 – Kritéria pro hodnocení záměsové vody [9]

Voda užitková, přírodní podzemní i povrchová může být použita do betonu, pokud neobsahuje velkém množství solí a látky, které negativně ovlivňují hydrataci cementu (rašelina, cukry, částice uhlí).

Odpadní a splaškové vody, stejně také vody slatinní, hladové jsou nepoužitelné pro výrobu a ošetřování betonu. Podmínečně použitelné jsou vody průmyslové, které byly chemicky analyzovány a pravidelně kontrolovány.

Důležitým faktorem ve složení vody je obsah chloridových iontů. Maximální povolené množství je uvedeno v tabulce č. 13.

Vodní součinitel udává množství vody, které bylo přidáno k množství cementu.

$$w = \frac{m_v}{m_c} \quad (5)$$

kde:

- w - vodní součinitel,
- m_v - množství vody [kg],
- m_c - množství cementu [kg].

Hodnota vodního součinitele se pohybuje v rozmezí 0,35 – 0,7.

2.3.4 Přísady

Modifikaci vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu zajišťují chemické sloučeniny, které nazýváme přísady. Tyto látky jsou přidávány do betonu během jeho míchání. Celkové množství přísad je do 5 % hmotnosti cementu. Fyzikálně-chemicky působí na cementový tmel. Druh a původ cementu ovlivňuje působení přísad v betonu. Větší reakční plocha je vytvářena vyšším měrným povrchem cementu. Mineralogické složení, zejména obsah C_3A , $CaSO_4$, má vliv na účinnost přísad.

Přísady jsou rozdělovány, dle ČSN EN 934-2 [8], do těchto kategorií:

- plastifikační,
- superplastifikační,
- stabilizační,
- provzdušňující,
- urychlující tuhnutí cementu,
- urychlující tvrdnutí cementu,

- zpomalující tuhnutí,
- hydrofobizační (těsnící).

Plastifikační přísady

Stejná zpracovatelnost čerstvého betonu je zachována při redukci množství záměsové vody (snížení w/c). Nejčastěji a nejdéle používané. Betony s plastifikačními přísadami mají nižší pórovitost. Využití nacházejí při výrobě transportbetonu (zlepšení zpracovatelnosti), hutnění betonu (omezení vibrace), lepší vzhled pohledových ploch.

Superplastifikační přísady

Látky, při zachování stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu, výrazně redukuje potřebné množství vody (o více jak 12 %). Zlepšují počáteční i konečné pevnosti betonu, ukládání čerstvého betonu, výrobu samozhutnitelného betonu.

Stabilizační přísady

Redukují odmísení chemicky nevázané (volné) vody z cementového tmele (krvácení betonu) [10]. Zvyšují soudržnost betonu s výztuží a povrch betonových konstrukcí.

Provzdušňující přísady

Po přidání do betonu mají schopnost vytvářet uzavřené vzduchové póry. Zlepšují odolnost betonu proti účinkům ledu a chemických solí.

Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí

Hydratace cementového tmele je po přidání přísad urychlována. Přechod čerstvého betonu z plastického stavu do stavu tuhé látky nastává o 1 – 3 hodiny dříve. Beton má vyšší počáteční pevnosti. Využití u stříkaného betonu, ochrana proti zmrznutí povrchu.

Přísady zpomalující tuhnutí

Tyto látky mají opačný účinek oproti přísadám urychlující tuhnutí a tvrdnutí cementu. Proces hydratace cementu je zpomalován. Doba přechodu z plastického stavu do stavu tuhé látky je prodloužena. Beton je déle zpracovatelný. Využití u transportbetonu na delší vzdálenosti, u masivních konstrukcí snížení vývinu hydratačního tepla.

Hydrofobizační (těsnící) přísady

Látky snižující pórovitost cementového kamene, ale zároveň zvyšují jeho hutnost. Zmenšují nebo zcela zatěsňují průřez kapilár. Snižují nasákavost betonu. Aplikace je možná i dodatečně ve formě nátěru. Využití u vodotěsných betonů.

2.3.5 Příměsi

Jemné práškovité látky, přidávané do betonu za účelem zlepšení vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu, nazýváme příměsi.

Příměsi dělíme na dva typy [2]:

- inertní příměsi (typ I),
- aktivní příměsi (typ II).

Inertní příměsi, nemají téměř žádné hydraulické schopnosti, a proto se nepodílejí na hydrataci cementu. Zvyšují hutnost popřípadě zpracovatelnost cementového tmele. Spotřeba záměsové vody stoupá s potřebou smočení povrchu příměsí. Do skupiny inertních příměsí patří mleté horniny, kamenná moučka, barevné pigmenty.

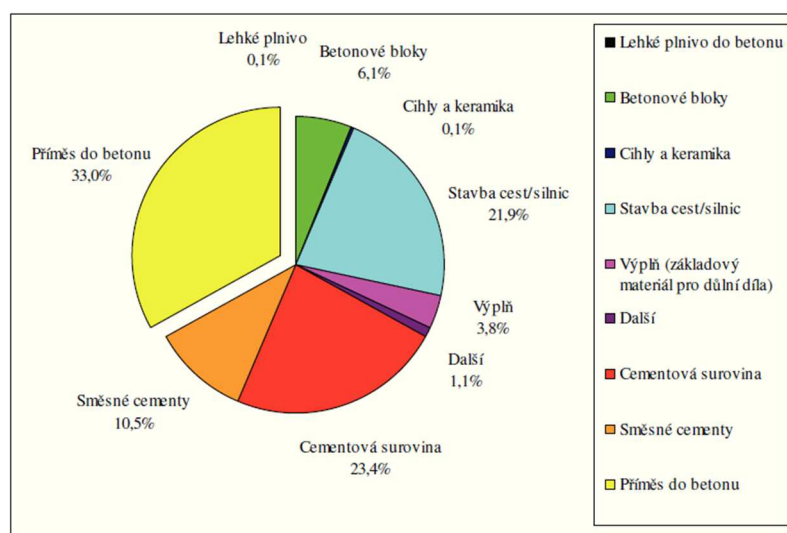
Aktivní příměsi, díky svému chemickému složení, přispívají k pevnosti cementu. Aktivní příměsi, které samy po smíchání s vodou nepřispívají ke zpevnění, nazýváme latentně hydraulické látky. Za přítomnosti budičů jsou schopny přispívat ke zpevnění cementového tmele. Vysokopecní struska patří mezi nejvýznamnější latentně hydraulické látky. Látky obsahující amorfnní SiO_2 , jsou látky pucolánové. Amorfnní SiO_2 je schopen reagovat s hydroxidem vápenatým Ca(OH)_2 za vzniku C-S-H gelu. Do této skupiny patří mikrosilika a popílek.

Množství příměsí dávkovaných do betonu je větší než množství přísad. Příměsi jsou z tohoto důvodu započítávány do objemové skladby betonu.

Popis příměsí, které byly využity v této diplomové práci:

Popílek

Spalováním uhlí v práškovém stavu vzniká popílek. Jeho využívání je z ekologického hlediska žádoucí, protože představuje značný objem odpadu (cca 66%). V ČR je využíván popílek z hnědého uhlí. Popílek, díky obsahu min. 25 % aktivního SiO_2 , patří do skupiny aktivních příměsí. Popílek je odpad, který je výrazně levnější než cement. Nahrazení části cementu popílkem snižuje náklady na beton. Před každým použitím do betonu je důležité zjistit, zda popílek splňuje požadavky dle normy ČSN EN 206 [2].



Graf č. 1 – Využití popílku ve stavebnictví [17]

Druhy využití popílku do betonu [1]:

- filer – zlepšuje zpracovatelnost a soudržnost čerstvého betonu, optimalizuje křivku zrnitosti, zvyšuje podíl jemných částic,
- náhrada dávky cementu – využití pucolánových vlastností, snížení množství cementu bez ovlivnění konečné pevnosti,
- masivní konstrukce – pozitivně ovlivňuje proces tuhnutí a tvrdnutí a vývin hydratačního tepla, omezuje smršťování betonu,
- agresivní prostředí – zvyšuje odolnost betonu vůči agresivnímu prostředí,
- hutnost cementového tmele – zvyšuje odolnost betonu proti tlakovým vodám, beton odolnější vůči karbonataci.

Nevýhody popílku [1]:

- vysoký obsah CaO – snížení konečných pevností betonu, objemové změny čerstvého betonu,
- vysoký obsah SO₃ – objemové změny betonu a koroze,
- vysoký podíl spalitelných látek – ovlivnění obsahu vzduchu v betonu, odlupování povrchu betonu, narušení procesu tuhnutí a tvrdnutí,
- vysoký obsah chloridů – koroze výztuže,
- nepřiměřená dávka popílku – krvácení betonu,
- nevhodné použití – nepoužívat popílek při betonování za nízkých teplot.

Vlastnost podle způsobu užití popílku	Jednotka	Pucolánová příměs druhu II	Filer jako kamenivo příměs druhu I
		ČSN EN 450	ČSN EN 12620
Ztráta žháním	% hmot.	max. 5,0 ¹⁾	–
Obsah SO ₃	% hmot.	max. 3,0	max. 0,8
Obsah celkové síry	% hmot.	–	1,0
Obsah chloridů v přepočtu na Cl-	% hmot.	max. 0,10	0,03/0,06/0,15 ⁶⁾
Obsah volného CaO	% hmot.	max. 1,0 ²⁾	–
Jemnost, zbytek na síti 0,045 mm	% hmot.	max. 40 ³⁾	–
Sítový rozbor, propad na síti: 2 mm 0,125 mm 0,063 mm	%	–	100 85 – 100 70 – 100
Obsah aktivního SiO ₂	% hmot.	min. 25	–
Objemová stálost (roztlačnost)	mm	max. 10 ²⁾	–
Index účinnosti po 28 (90) dnech	%	min. 75 (85)	–
Měrná hmotnost (tolerance)	kg.m ⁻³	max. ±150 ⁴⁾	–
Hmotnostní aktivita Ra ²²⁶	Bq.kg ⁻¹	max. 200 ⁵⁾	–

Vysvětlivky k tabulce z odkazů a poznámek uvedených norem:

¹⁾ Na národní úrovni je dovoleno používat popílky se ztrátou žháním až do 7% hmotnosti.

²⁾ Popílek s obsahem volného oxidu vápennatého více než 1,0% hmotnosti, ale méně než 2,5% hmotnosti je přijatelný za předpokladu, že vyhoví požadavkům na objemovou stálost.

³⁾ Jemnost mletí popílku nesmí kolísat o více než ±10% z průměrné hodnoty, která je stanovena za předem dané časové období výrobcem.

⁴⁾ Tolerance od průměrné hodnoty uváděné výrobcem.

⁵⁾ Limit hodnoty stanovený vyhláškou SÚJB č. 184/1997 Sb.

⁶⁾ Maximální hodnoty pro předpjatý, železový a prostý beton vodou rozpustných Cl⁻ k hmotnosti celkového kameniva.

Tabulka č. 14 – Základní požadavky na popílek do betonu [1]

Chemické složení popílku [19]:

SiO₂ 40 - 60 %,

Al₂O₃ 15 – 25 %,

Fe₂O₃ 5 – 15 %,

CaO 2 – 15 %,

MgO, FeO

Vysokopecní struska

Struska je pevný nekovový vedlejší produkt vznikající při výrobě surového železa v průmyslových pecích. Vysokopecní struska má zásaditou povahu. Oxidy křemíku (SiO₂), vápníku (CaO) a případně hořčíku (MgO) jsou převažujícími složkami strusek. Společný obsah těchto oxidů zaujímá přes 90 % složení. Struska, která má latentně hydraulické vlastnosti, vzniká rychlým ochlazením struskové taveniny. Struska vzniklá tímto postupem, má název granulovaná vysokopecní struska (GVS). GVS je možné využívat jako náhradu cementu při použití do betonu (snížení množství cementu). Množství strusky, které je možné smíchat s cementem, se pohybuje v rozmezí 6 – 95 % strusky z celkového množství pojiva. Struska má výrazně pomalejší hydratační proces. Hydratační teplo betonu je snižováno, jestliže podíl strusky je zvyšován.

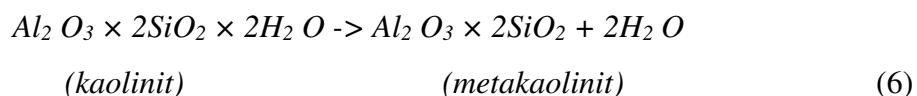
Oxid	Obsah v %
SiO ₂	21-40
Al ₂ O ₃	5-14,5
FeO	0,2-2,8
MnO	0,2-10,5
CaO	29-48
MgO	1-1,15

Tabulka č. 15 – Chemické složení vysokopecní strusky

Metakaolin

Příměs na bázi pucolánu vyrobená výpalem na teplotu 600 – 900°C je metakaolin. Kaolin a kaolinitické jíly jsou hlavními surovinami pro výrobu metakaolinu.

Rovnice výpalu:



Hlavní oxidy obsažené v metakaolinu jsou SiO_2 , Al_2O_3 , v malém množství může obsahovat CaO , MgO či Fe_2O_3 a K_2O . Metakaolin reaguje v betonu především s $Ca(OH)_2$. Výsledkem těchto reakcí je vznik hydratovaných kalcium aluminátů a silikátů. Tyto silikáty mají pozitivní vliv na kvalitu betonu. Použitím metakaolinu jako přísady do betonu, je zvýšena pevnost v tahu i tlaku, fyzikálně chemické a mechanické vlastnosti. Zabraňuje pronikání škodlivých látek do betonu, snižuje náchylnost k alkalicko-křemičité reakci, lépe odolává agresivnímu prostředí. Jelikož je metakaolin aktivní příměsí, může nahradit cement do cca 10% hmotnostních. Betony s využitím metakaolinu jsou používány ke stavbě vodních děl, mostů a silnic.

Vlastnost metakaolínu	Značka metakaolínu				
	Mefisto K05	N META 4	S META 4	I META 4	KM 40
SiO_2 [hm. %]	59,00	53,52	53,08	52,94	52,35
Al_2O_3 [hm. %]	37,50	43,42	42,47	41,04	40,10
Fe_2O_3 [hm. %]	0,70	0,91	1,03	1,64	1,45
TiO_2 [hm. %]	0,53	0,59	0,33	0,36	0,74
CaO [hm. %]	0,11	0,32	0,33	0,26	0,38
MgO [hm. %]	0,26	0,25	0,24	0,30	0,40
K_2O [hm. %]	0,72	0,45	0,95	1,63	1,43
Na_2O [hm. %]	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
ztráta žháním [hm. %]	1,21	0,43	1,43	1,81	3,12
míra rozlití [mm]	130	200	130	160	150

Tabulka č. 16 - Chemické vlastnosti a míra rozlití metakaolínu (typické hodnoty) [19]

Vápenec (mikromletý)

Vápenec je vyráběn mletím drceného vápence. Jemnost mletí a granulometrie vápence ovlivňuje jeho výslednou kvalitu. Jedná se o plnivo na bázi uhličitanu vápenatého (CaCO_3). Vápenec může také obsahovat MgCO_3 a SiO_2 .

Vápenec by měl obsahovat 70 % zrn, které propadly sítem 0,063 mm. Obecně je lepší pokud má vápenec pouze zrna menší než 0,125 mm. Zrno o velikosti 70 – 80 mikrometrů je nejvhodnější.

Kladný vliv na nárůst počátečních pevností má měrný povrch vápence, který je větší než u cementu. Vytváření kalciualuminátů, urychlujícího efektů na hydrataci C_3A , C_3S a změny v C-S-H, je ovlivněno reaktivitou vápence.

Částice rozpuštěné v C-S-H se dříve srazí a tím rychleji spojí. Po 28 dnech je tento stav již zanedbatelný. Jestliže cement obsahuje velké množství hlinitanové fáze, vznikají hlinitokřemičitany, které mají pojící schopnost. Vápenec zvyšuje při stejné dávce vody zpracovatelnost betonu. Množství vody (vodní součinitel) je možné snížit a docílit tím vyšších pevností.

Oxid	Obsah v %
CaO	55,09
SiO ₂	1,50
Al ₂ O ₃	0,61
Fe ₂ O ₃	0,25
MgO	0,37

Tabulka č. 17 – Chemické složení mikromletého vápence [20]

Velikost otvoru síta [mm]	Zbytek na síti [hmot. %]
1,000	-
0,200	1,8
0,125	7,3
0,090	15,3
0,063	26,4
0,045	33,8
pod 0,045	66,2

Tabulka č. 18 – Sítový rozbor mikromletého vápence

3. Experimentální část – analýza betonu z hlediska použitých vstupních složek

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na analýzu betonu podle postupu, který je uveden v normě ČSN 73 1323 [28]. Výsledné hodnoty poté byly porovnány s normou ASTM C 1084-02 [30].

3.1 Popis zkoušených materiálů

Experimentální část mé diplomové práce se zabývá analýzou betonu z hlediska jeho použitých složek, které byly použity pro výrobu. Pro účely této práce jsem si zvolil pět druhů betonů:

- a) vysokopevnostní beton C 80/95,
- b) „klasický“ beton C 30/37,
- c) samozhutnitelný beton C 30/37 – s příměsí popílků,
- d) samozhutnitelný beton C 30/37 – s příměsí vápence,
- e) samozhutnitelný beton C 30/37 – s příměsí strusky.

Všechny druhy betonů, které byly použity pro účely této práce, byly vyrobeny podle navržených receptur. V každém čerstvém betonu byl použit cement Hranice CEM I 42,5 R. Frakce kameniva byly použity 0/4; 4/8; 8/16.

Navržené receptury zkoušených betonů:

Označení:	Složky:		Druh	Množství na 1 m ³ [kg]	Množství na 22l [kg]
C 80/95	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	455	10,01
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	687	15,11
		4/8	Drcené - čedič	138	3,04
		8/16	Drcené - čedič	1057	23,25
	Voda			140	3,08
	Příměs	Metakaolin		32	0,70
	Přířada	Plastifikátor		6,3	0,14

Tabulka č. 19 – Navržená receptura betonu C 80/95

Označení:	Složky:		Druh	Množství na 1 m³ [kg]	Množství na 22l [kg]
C 30/37-P	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	400	8,8
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	600	13,2
		4/8	Těžené, Tovačov	150	3,3
		8/16	Drcené	750	16,5
	Voda			240	5,28
	Příměs	Popílek		200	4,4
	Přísada	Plastifikátor		5	0,11

Tabulka č. 20 – Navržená receptura betonu C 30/37 – s příměsí popílku

Označení:	Složky:		Druh	Množství na 1 m³ [kg]	Množství na 22l [kg]
C 30/37	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	340	7,48
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	898	19,76
		4/8	Těžené, Tovačov	372	8,18
		8/16	Drcené	526	11,57
	Voda			185	4,07
	Příměs	---		---	
	Přísada	---		---	

Tabulka č. 21 – Navržená receptura betonu C 30/37

Označení:	Složky:		Druh	Množství na 1 m³ [kg]	Množství na 22l [kg]
C 30/37-V	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	400	8,8
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	600	13,2
		4/8	Těžené, Tovačov	150	3,3
		8/16	Drcené	750	16,5
	Voda			190	4,18
	Příměs	Vápenec		200	4,4
	Přísada	Plastifikátor		3	0,07

Tabulka č. 22 – Navržená receptura betonu C 30/37 – s příměsí vápence

Označení:	Složky:		Druh	Množství na 1 m ³ [kg]	Množství na 22l [kg]
C 30/37-S	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	400	8,8
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	600	13,2
		4/8	Těžené, Tovačov	150	3,3
		8/16	Drcené	750	16,5
	Voda			175	3,85
	Příměs	Struska		200	4,4
	Přísada	Plastifikátor		1,5	0,03

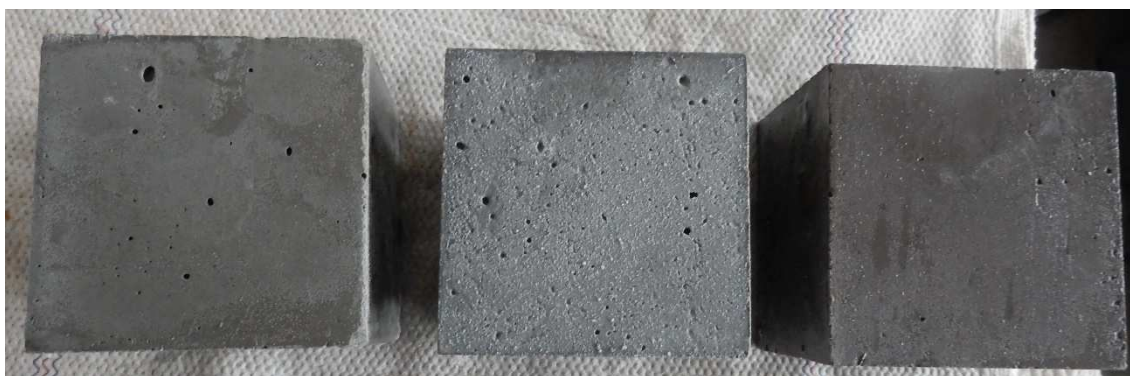
Tabulka č. 23 – Navržená receptura betonu C 30/37 – s příměsí strusky

3.2 Výroba zkušebních vzorků

Receptury betonu jsem navrhl na 1 m³ čerstvého betonu a poté přepočítal pro potřeby mé práce. Konečné množství z jednoho druhu betonu jsem stanovil na 22 litrů. Každý druh betonu byl vyroben v laboratorní míchačce. Před začátkem míchání byly všechny potřebné materiály naváženy na laboratorní váze. Míchačka byla nejdříve navlhčena vodou, poté byly do ní nasypány všechny frakce kameniva od nejhrubší po nejjemnější, tj. 8/16, 4/8, 0/4. Samotné kamenivo bylo zamícháno v míchačce po dobu cca 1 min. Následně byl přidán cement, který jsem umístil do připraveného důlku v kamenivu. Před zahájením míchání jsem cement zakryl okolním kamenivem. Tímto krokem bylo předejito prášení pojiva a jeho následný úbytek. Kamenivo a cement jsem v míchačce promíchal tak, aby se jednotlivá zrna kameniva obalila cementem. Po přidání vody byl čerstvý beton míchán po dobu cca 2 min, aby vznikla homogenní směs. V případě vysoké vlhkosti kameniva byla provedena redukce vody s ohledem na vodní součinitel betonu. Poslední byly přidávány do jednotlivých směsí plastifikátor, přísada nebo příměs a vše bylo naposledy promícháno.

Čerstvý beton byl ukládán do připravených forem. Formy byly vymazány odformovacím olejem pro snadnější odformování. Čerstvý beton byl uložen v laboratorním prostředí. Po jednom dni byl beton odformován, krychle jsem označil a umístil do vodního prostředí, kde zůstaly po dobu 28 dnů.

Z každého druhu betonu jsem vyrobil 15 ks krychlí o rozměrech 100 x 100 x 100 mm.



Obr. 6 – Betonové zkušební krychle

3.3 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Objemovou hmotností ztvrdlého betonu jsem stanovil pomocí měření skutečných rozměrů (geometrická D), vážením vzorků ve vodě (OH) a hustotu pomocí pyknometru.

3.3.1 Stanovení geometrické objemové hmotnosti

Objemová hmotnost zkušebních vzorků (krychlí), jejichž rozměry byly 100x100x100 mm, byla stanovena dle normy ČSN EN 12390-7 [31]. Po vyjmutí z vodní lázně, byly vzorky povrchově osušeny, pomocí posuvného měřidla změřeny jejich rozměry a nakonec zváženy. Naměřenou hodnotu na váze jsem mohl považovat za hmotnost vzorku nasyceného kapalinou váženého na vzduchu (m_3), protože betonové krychle byly před stanovením objemové hmotnosti uloženy 28 dní ve vodní lázni, aby bylo zajištěno jejich dostatečné vyžrání. Krychle jsem poté umístil do sušárny s nucenou cirkulací vzduchu, kde byla nastavena požadovaná teplota (105 ± 5) °C. V sušárně jsem vzorky ponechal 24 hodin. Po uplynutí této doby, byly krychle vytaženy z sušárny a umístěny na cca 30 minut do laboratoře, aby vychladly. Následně jsem vysušené vzorky zvážil (m_1) a pomocí posuvného měřidla změřil jejich rozměry (V).

Ze zjištěných hodnot hmotnosti zkušební tělesa a jeho objemu se vypočítá objemová hmotnost z následujícího vztahu, zaokrouhlená na nejbližších 10 kg/m³:

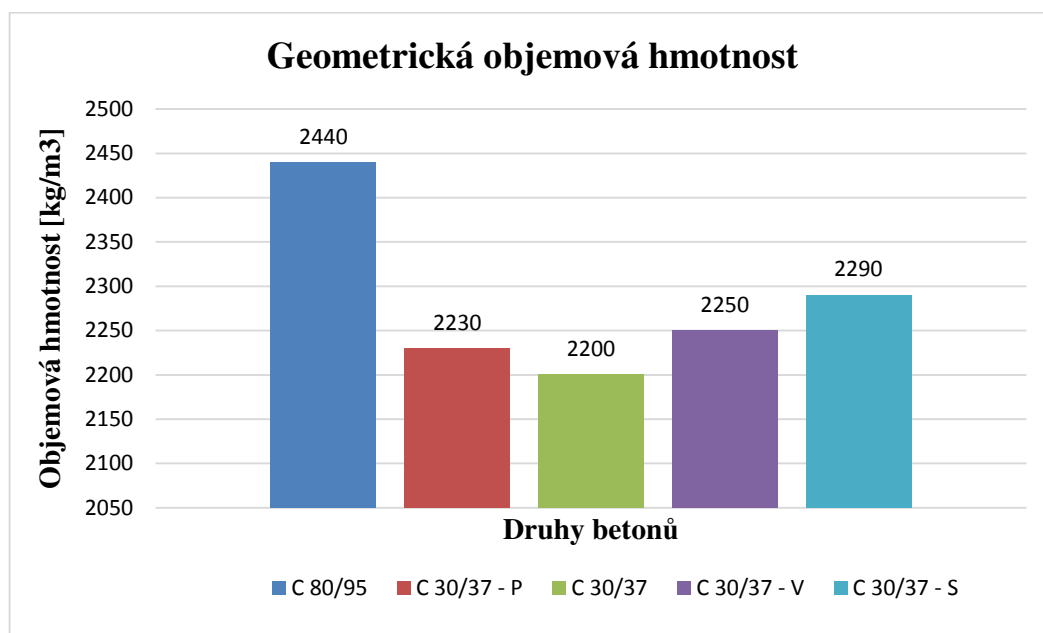
$$D = \frac{m_1}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (7)$$

kde: D – objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m³],

m_1 – hmotnost vysušeného zkušební tělesa [kg],

V – celkový objem zkušební vzorku [m³].

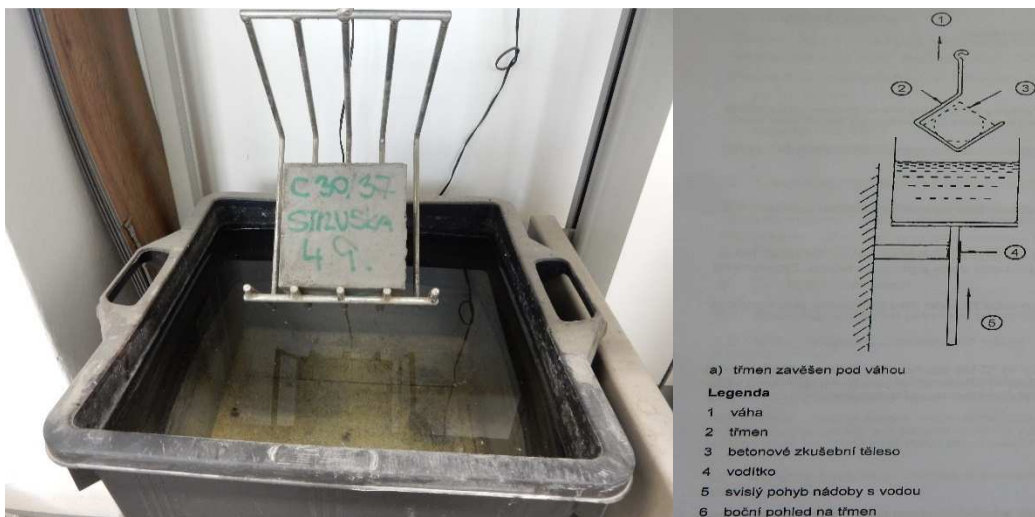
Hodnoty geometrické objemové hmotnosti (D) jsou uvedené v příloze 1 a jejich průměrné hodnoty zaznamenány v grafu č. 2.



Graf č. 2 – Stanovení geometrické objemové hmotnosti

3.3.2 Stanovení objemové hmotnosti metodou vážení nasyceného vzorku

Stanovení objemové hmotnosti metodou vážení nasyceného vzorku bylo provedeno na stejných krychlích jako v kap. 3.3.1. Po stanovení hmotnosti zkušebních vzorků m_3 , jsem na krychlích stanovil jejich hmotnost při ponoření ve vodním prostředí. Nejprve byl do kádě s vodou ponořen pouze třmen přístroje, naměřená hmotnost třmenu byla na váze nastavena jako nulová hodnota (tárování). Zkušební krychle se položila do třmenu a nádoba s vodou byla zvedána do takové polohy, aby krychle byla zcela pod hladinou vody (obr. 6). Úroveň hladiny vody musela být vždy na stejném místě třmenu, jako když třmen byl ponořen do nádoby bez tělesa. Zjištěná hodnota je hmotnost m_2 . Po vytažení vzorků z nádoby jsem je povrchově osušil a umístil do sušárny na dobu 24 hodin. Po uplynutí této doby byly krychle vytaženy z sušárny a umístěny na cca 30 minut do laboratoře, aby vychladly. Následně jsem vysušené vzorky zvažil (m_1).



Obr. 7 - Stanovení objemové hmotnosti metodou vážení nasyceného vzorku

Ze zjištěných hodnot hmotnosti zkušebního tělesa a jeho objemu se vypočítá objemová hmotnost z následujícího vztahu, zaokrouhlená na nejbližších 10 kg/m³:

$$OH = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_{liq} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (8)$$

kde: OH – objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m³],

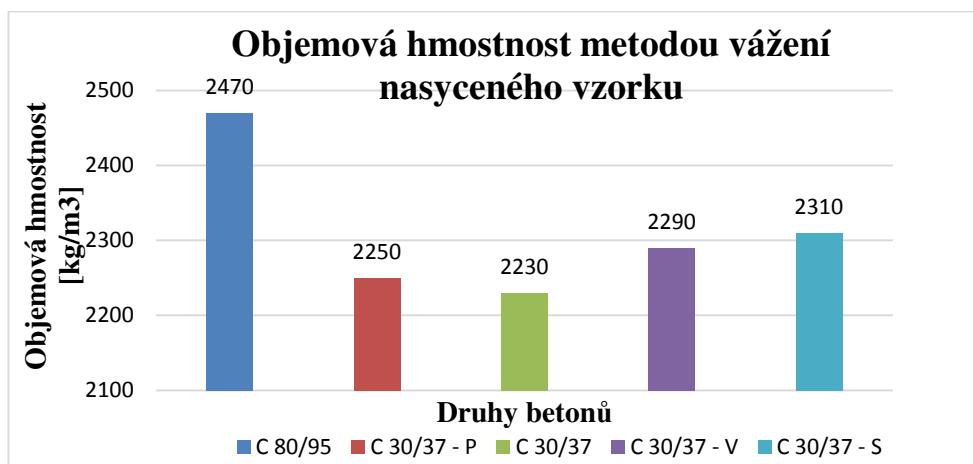
m_1 – hmotnost suchého vzorku [kg],

m_2 – hmotnost vzorku nasyceného kapalinou váženého ve vodě [kg],

m_3 – hmotnost vzorku nasyceného kapalinou váženého na vzduchu [kg],

ρ_{liq} – hustota kapaliny, která byla použita pro hydrostatické vážení [kg/m³].

Naměřené a vypočítané hodnoty objemové hmotnosti metodou vážení nasyceného vzorku (OH) jsou uvedené v příloze 1 a jejich průměrné hodnoty zaznamenány v grafu č. 3.



Graf. č 3 – Objemová hmotnost metodou vážení nasyceného vzorku

3.3.3 Stanovení hustoty (objemové hmotnosti) betonu pyknometrickou metodou

Pro měření hustoty kapalin a látek je jednou z nejpřesnějších metod pyknometrická metoda. Vysušený, prázdný pyknometr i se zábrusovou zátkou zvážíme na analytické váze s přesností na 0,0001 g. Naměřenou hodnotu pyknometru jsem zaznamenal. Pyknometr byl do jedné třetiny naplněn vysušeným zkušebním materiálem a zvážen. Zkušebním materiálem byl beton, který jsem před zkoušením rozemlel na betonový prášek co nejjemnější frakce. Počáteční hmotnost zkušebního materiálu (m_1) je rozdíl hmotností mezi pyknometrem do jedné třetiny naplněným a pyknometrem prázdným. Pyknometr jsem opatrně až po okraj doplnil demineralizovanou vodou a uzavřel zátkou. Pyknometr jsem z vnější strany osušil od přebytečné vody a zvážil. Zaznamenaná hodnota je hmotnost (m_2). Pyknometr byl vyčištěn, znovu zcela doplněn pouze použitou kapalinou a následně zvážen (m_3).

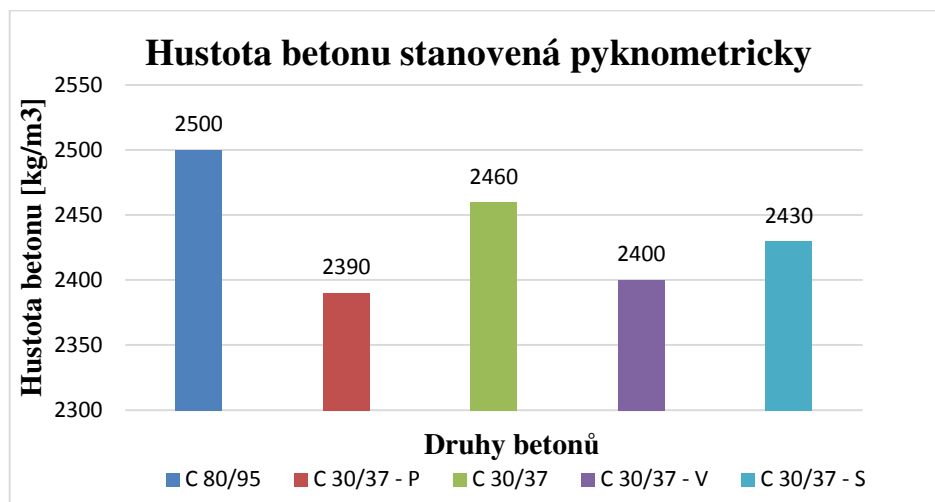
Vypočítané hodnoty hustoty betonu jsou uvedené v příloze 1 a v grafu č. 4.

Hustota byla vypočtena dle vztahu:

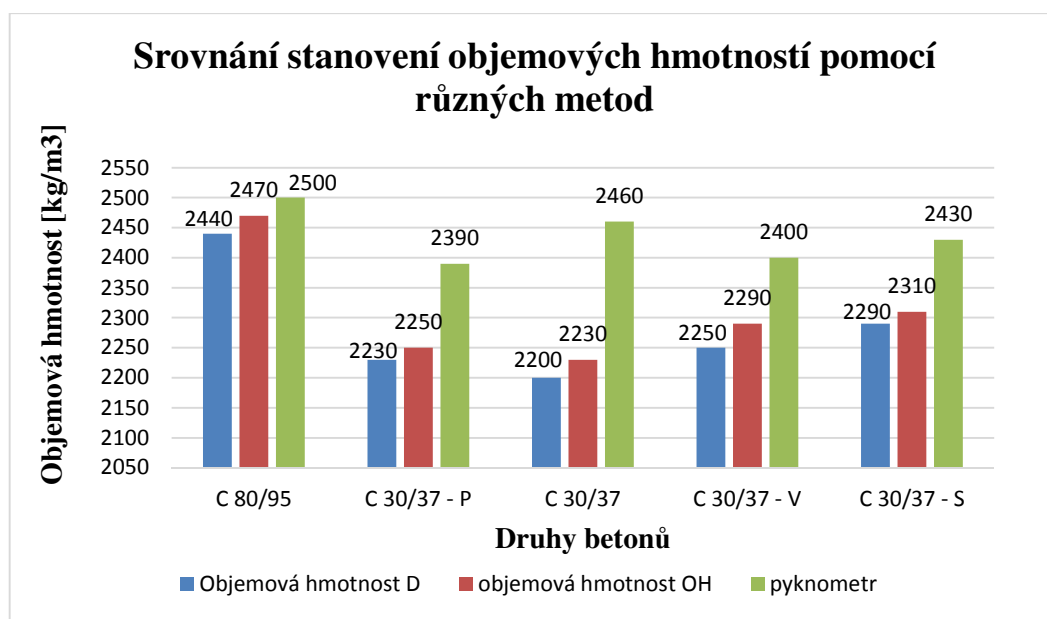
$$\rho = \frac{m_1}{m_3 + m_1 - m_2} \cdot \rho_{liq} \quad (9)$$

kde:

- ρ - hustota zkoušeného materiálu [g/cm^3],
- m_1 - hmotnost suchého vzorku [g],
- m_2 - hmotnost pyknometru s kapalinou a vzorkem [g],
- m_3 - hmotnost pyknometru s kapalinou [g],
- ρ_{liq} - hustota kapaliny použité pro hydrostatické vážení [g/cm^3].



Graf č. 4 – Hustota betonu stanovená pomocí pyknometru



Graf č. 5 – Srovnání objemových hmotností zjištěných pomocí různých postupů

3.3.4 Pórovitost a nasákavost

Naměřené hodnoty geometrické objemové hmotnosti a objemové hmotnosti metodou vážení nasyceného vzorku posloužily k výpočtu zdánlivé a skutečné pórovitosti a nasákavosti zkoušených betonů. Vypočítané hodnoty pórovitosti (zdánlivé a skutečné) a nasákavosti jsou uvedeny v příloze 1, tabulka P1/11 a jejich průměrné hodnoty uvedeny v grafech č. 6 – 9.

$$PZ = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_1} \cdot 100 \quad (10)$$

$$PS = \frac{\rho - \rho_{OH}}{\rho} \cdot 100 \quad (11)$$

$$NV = \frac{m_3 - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad (12)$$

kde:

PZ - zdánlivá pórovitost [%],

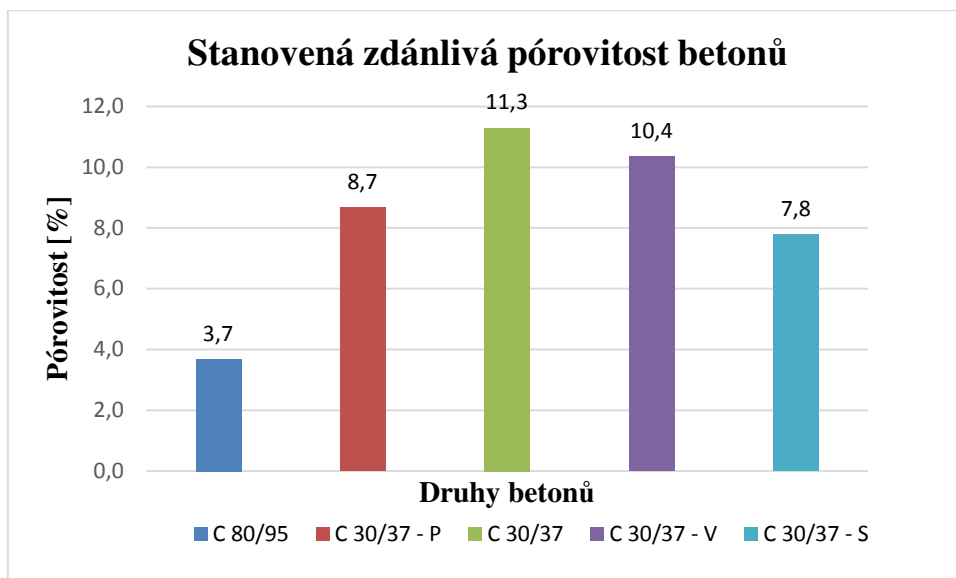
PS - skutečná pórovitost [%],

NV - nasákavost [%],

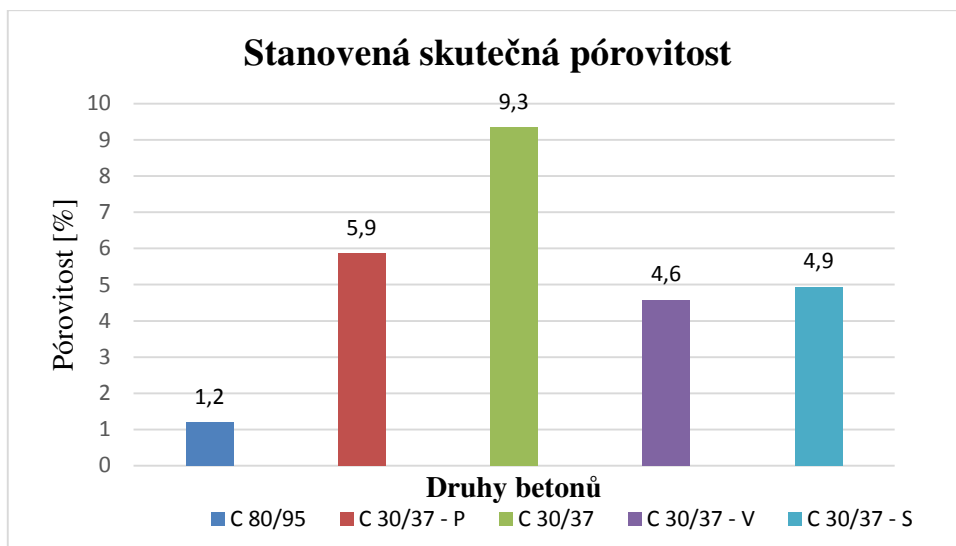
m_1 - hmotnost suchého vzorku [g],

m_2 - hmotnost vzorku nasyceného kapalinou váženého ve vodě [g],

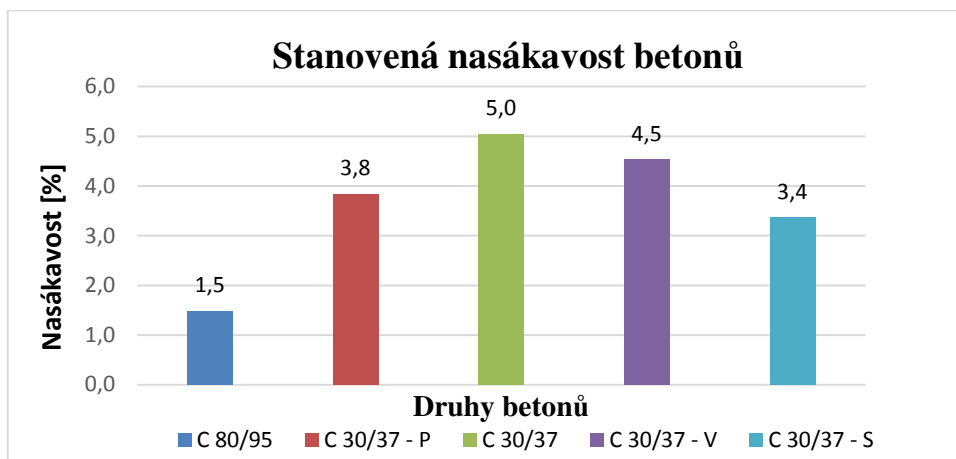
m_3 - hmotnost vzorku nasyceného kapalinou váženého na vzduchu [g].



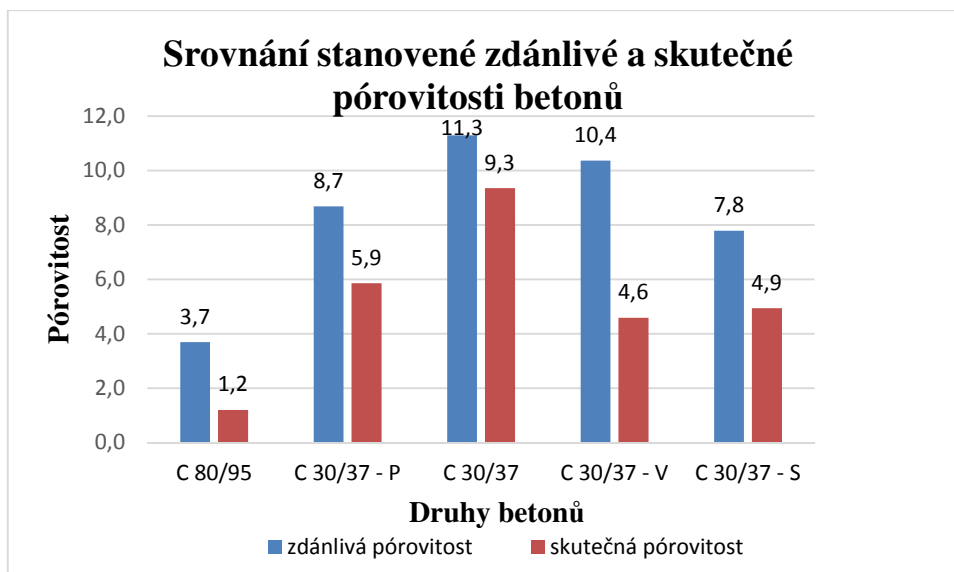
Graf č. 6 – Srovnání zdánlivých pórovitostí betonů



Graf č. 7 – Skutečná pórovitost betonů



Graf č. 8 – Nasákavost betonů



Graf č. 9 – Srovnání zdánlivé a skutečné pórovitosti betonů

3.4 Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu

Podélné mechanické vlnění, jehož frekvence leží nad slyšitelnou oblastí lidského sluchu, je ultrazvuk. Pro technickou praxi byla tato hranice určena hodnotou 20 kHz. Rozsah vlnění používaný ve stavebnictví je od 20 kHz do 500 kHz. Ultrazvuk má vlnovou délku menší než zvukové vlnění, není tolik pohlcován prostředím a více se odráží od překážek. Tato metoda je využívána k provádění nedestruktivních zkoušek, kde není potřeba zásah do konstrukce.

Princip ultrazvukové impulsové metody spočívá v měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu příslušným materiálem. Elektroakustický budič, který je osazen na ploše zkoušeného materiálu vyvolá impuls mechanického vlnění. Impuls vibrací, který projde známou délkou dráhy v materiálu, je snímačem přeměněn na elektrický signál a elektronický časový okruh umožňuje změřit dobu průchodu impulsu. Nehomogenita materiálu a vlhkost, při zkoušení betonu, ovlivňují rychlost šíření ultrazvukové vlny. Fyzikálně mechanické vlastnosti betonu jsou určovány ze stanovené rychlosti šíření ultrazvukového vlnění.

Výsledek ultrazvukového měření pomáhá dále zjišťovat tyto veličiny [21]:

- rychlost šíření ultrazvukového vlnění,
- dynamický modul pružnosti,
- pevnost betonu,
- degradaci betonu,
- jiné vlastnosti (např. statický modul pružnosti, objemovou hmotnost).

Vyhodnocení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v betonu

Rychlost šíření impulsu se vypočte ze vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \left[\frac{\text{km}}{\text{s}} \right] \quad (13)$$

kde: v_L – je rychlost impulsu [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$],

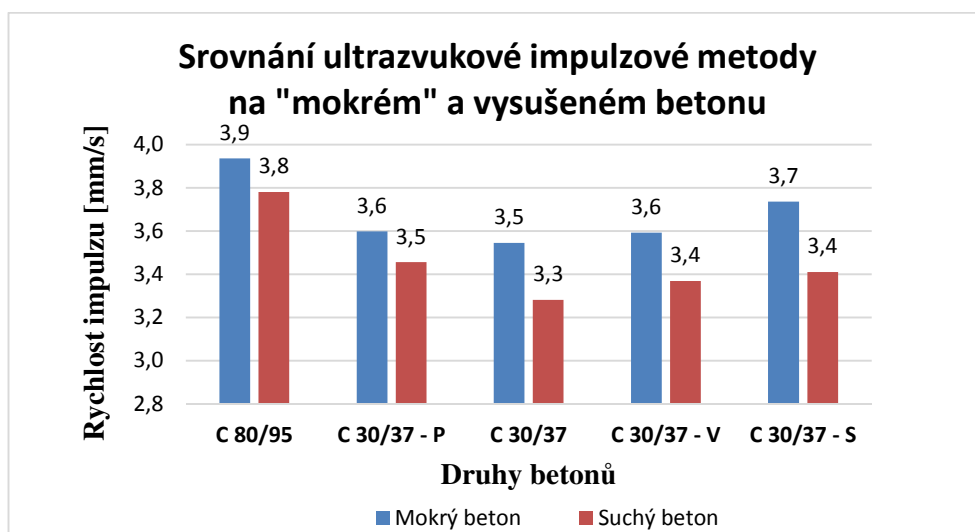
L – délka měřicí základny [mm],

T – čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou [s].

Výsledky provedených zkoušek ultrazvukové impulzové metody na betonových krychlích, které byly nasyceny vodou, jsou uvedeny v příloze 1, tabulky P1/1a – 7a. Výsledky provedených zkoušek ultrazvukové impulzové metody na vysušených betonových krychlích jsou uvedeny v příloze 1, tabulky P1/1b – 7b.



Obr. 8 - Měřicí přístroj TICO



Graf č. 10 – Srovnání výsledků ultrazvukové impulzové metody na různých betonech

3.5 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla zkoušena po 28 dnech uložení betonových krychlí ve vodním prostředí. Po vytažení jsem zkoušené vzorky povrchově osušil a umístil do lisu. Dotykové plochy tlačných desek hydraulického lisu se očistí a odstraní se zbytky uvolněného materiálu. Vzorky byly umístěny v lisu kolmo na směr plnění, ve kterém byly plněny do forem. Krychle byly umístěny do středu zkušebního lisu. Vzorek zkoušíme až do tlakového porušení.

Tlaková pevnost se vypočítá dle ČSN EN 12390-3 [1]:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (14)$$

kde:

f_c - pevnost betonu v tlaku [N/mm^2],

F - maximální tlaková síla, která působí na zkoušené těleso [N],

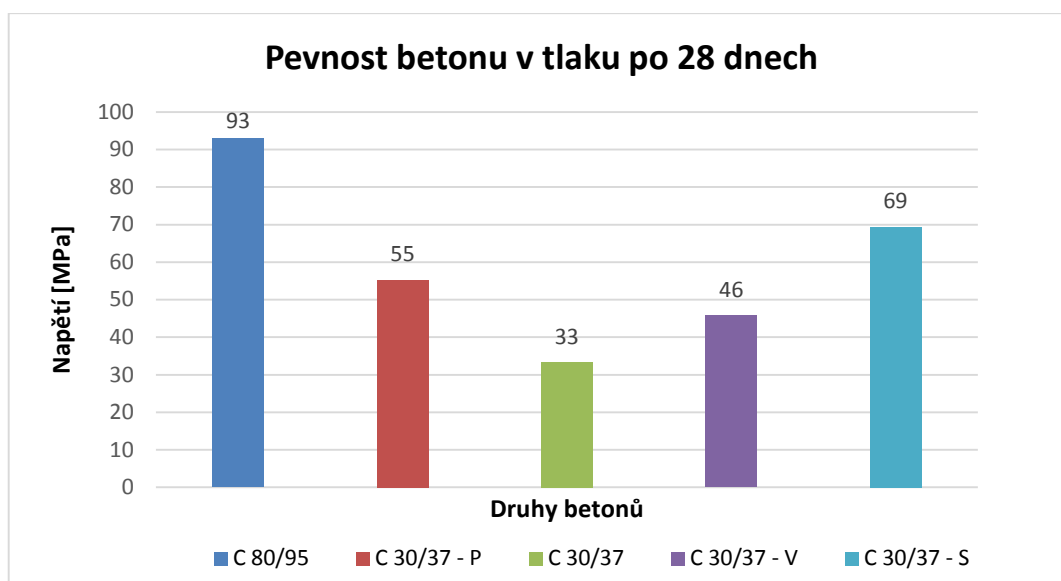
A_c - plocha zkoušeného vzorku [mm^2].

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa [1].

Hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v příloze 1 nebo přehledněji v grafu č. 11.



Obr. 9 - Zkouška pevnosti v tlaku



Graf č. 11 – Pevnost v tlaku zkoušených betonů

3.6 Příprava vzorků na laboratorní analýzy

Vysušené betonové krychle, které byly porušeny tlakovou silou lisu, byly dále co nejvíce narušeny pomocí kladívka, aby bylo možné odebrat věrohodné množství vzorku na další analýzy. Rozbité vzorky byly umístěny do sáčku, aby nepřijímaly vzdušnou vlhkost a tím nebyl ovlivněn další postup zkoušení. Následovalo rozdrčení betonových úlomků na jemnější frakci pomocí čelistového drtiče (Obr. 10). Výsledná frakce betonu je zachycena na obr. 9. Poslední fází přípravy vzorků bylo rozemletí vzorků na jemný betonový prášek s frakcí 0,0063 mm pomocí laboratorního mlýnu. Mlýn bylo potřeba nejprve důkladně očistit od nečistot, které zůstaly v mlýnu od předchozích použití. Do mlýnu (obr. 11) jsem nasypal potřebné množství betonu na rozemletí a nastavil dobu mletí na cca 1 minutu. Po uplynutí této doby jsem vzniklý betonový prášek přesypal do vzduchotěsných sáčků (obr. 11), protože pokud by zůstal v otevřeném prostředí, snadno by přijal vzdušnou vlhkost a tím by se navýšila jeho hmotnost. Mlýn jsem důkladně vyčistil od použitého betonu a připravil na mletí dalšího vzorku.

Rozdrčené betonové vzorky (obr. 10) jsem umístil do vnějšího prostředí (obr. 12) a do korozivního síranového prostředí – prostředí XA2 dle normy [2] (obr. 12). Část vzorků jsem ponechal v laboratorním prostředí. Tento beton jsem v tabulkách a grafech nazval jako „čistý“ beton.



Obr. 10 – Čelistový drtič; beton, který byl rozdrcen v drtiči



Obr. 11 – laboratorní mlýn; beton po rozmletí v mlýnu



Obr. 12 – uložení betonu do vnějšího prostředí (vlevo) a do korozivního síranového prostředí (vpravo)

3.7 Termická analýza

Experimentální analytické metody, které sledují fyzikální a chemické vlastnosti zkoumané látky v závislosti na čase nebo na teplotě, patří do skupiny termické analýzy. Při zahřívání nebo ochlazování tuhých popřípadě kapalných látek vznikají procesy, které jsou těmito metodami sledovány. Mezi tyto procesy patří např.: oxidace, fázové přeměny látek, disociace, dehydratace, krystalizace a tání. Během těchto procesů vznikají změny, které souvisejí s fyzikálně-chemickými vlastnostmi zkoumané látky. Změny nastávají v hmotnosti, objemu, rozměru, energii, elektrické vodivosti, magnetických vlastnosti [26].

Rozdělení termické analýzy na druhy [24]:

- Termická analýza (TA),
- Termogravimetrie (TG),
- Derivační termogravimetrie (DTG),
- Diferenční termická analýza (DTA),
- Diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC),
- Termodilatometrická analýza (TD),
- Simultánní termická analýza (STA),
- Analýza uvolněných plynů (EGD, EGA),
- Termomechanická měření (TMA, DMA).

Metody použité v diplomové práci

Metody, které jsem použil v mé diplomové práci, jsou termogravimetrie a diferenční kompenzační kalorimetrie. Analýzy byly prováděny na diferenčním kalorimetru (obr. 13), který provádí simultánní termickou analýzu. Tato analýza je schopna měřit několik vlastností v jednom měření, v tomto případě DSC/TG analýzu.



Obr. 13 - Diferenční kalorimetr SDT Q600

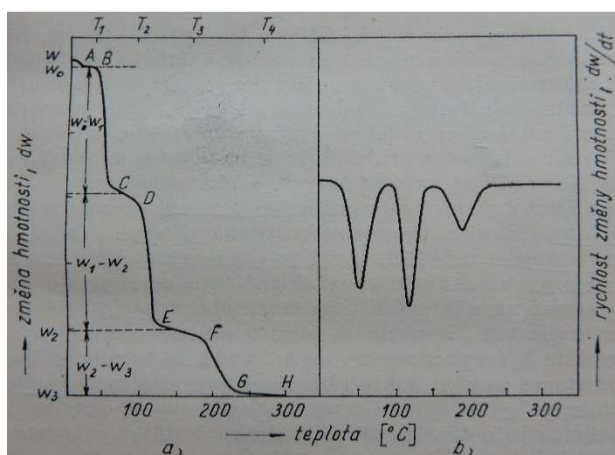
3.7.1 Termogravimetrie (TG)

Na principu plynulého sledování hmotnosti zkoumaného vzorku při jeho ohřevu je založena experimentální metoda zvaná termogravimetrie. Způsob ohřevu zkoumaného vzorku může být za konstantní teploty (izotermní termogravimetrie) nebo teplota ohřevu plynule stoupá a klesá (neizotermní termogravimetrie). Významné uplatnění má především neizotermní způsob ohřevu (dynamický), jelikož podává informace o celkovém tepelném chování studovaného materiálu.

Informace o složení výchozího vzorku, o jeho tepelné stálosti nebo tepelném rozkladu i o produktech, jež vznikají při rozkladu, podává termogravimetrická křivka.

Termogravimetrická křivka může vyjadřovat:

- Závislost hmotnosti (změny hmotnosti) na teplotě nebo čase (normální termogravimetrická křivka – obr. 14a),
- Závislost rychlosti změny hmotnosti na teplotě nebo čase (diferenciální termogravimetrická křivka – obr. 14b).



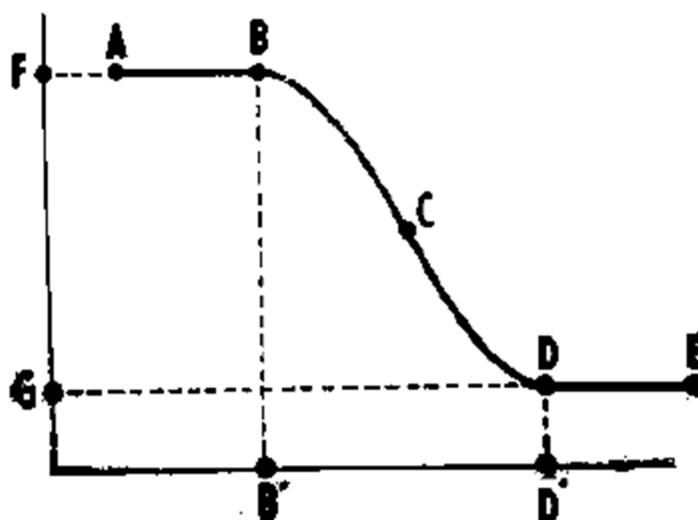
Obr. 14 – Druhy termogravimetrické křivky [32]

Faktory ovlivňující výsledky termogravimetrie:

Faktory ovlivňující výsledky termogravimetrie jsou rozděleny do skupin:

- Vlivy, plynoucí z vlastností použitého konstrukčního materiálu a celkové koncepce zařízení
 - Reakce zkoumané látky s kelímkem
 - Usazování a kondenzace reakčních produktů
 - Pěnění zkoumané látky
 - Kalibrace vah a teploty
 - Tvar, velikost a materiál kelímku

- Vlivy metodické a konstrukční
 - Rychlost ohřevu a přenosu tepla
 - Rychlost registrace křivky
 - Vliv atmosféry reakčního prostoru
 - Uspořádání ohřívaného prostoru a vlivy proudění
 - Způsob měření teploty
- Vlivy fyzikálních a chemických vlastností vzorku
 - Množství vzorku
 - Velikost částic
 - Tepelné zabarvení reakce
 - Tepelná vodivost vzorku
 - Druh vzorku a probíhající změny
 - Způsob úpravy vzorku



Obr. 15 – Popis zlomu na křivce TG: (ABCDE - křivka TG, BCD – zlom, B – počátek zlomu, C – inflexní bod, D – konec zlomu, B' - počáteční teplota, D' - konečná teplota, FG – výška zlomu, AB – přední základní linie, DE – zadní základní linie) [25]

3.7.2 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Nejpoužívanější metodou termické analýzy je diferenční skenovací kalorimetrie. Tato metoda je také nazývána „obrácenou“ diferenčně termickou analýzou. Udržení stejné teploty mezi zkoumaným vzorkem a referenčním vzorkem je základní pravidlo diferenční skenovací kalorimetrie. Vzorky jsou zahřívány a teplota tepelného toku je měřena.

Rozlišujeme dva typy DSC:

- DSC s kompenzací příkonu – kalorimetrické cely, do kterých jsou umístěné vzorky (referenční a analyzovaný), jsou základem pro tuto zkoušku. Oba vzorky jsou zahřívány stejnou rychlostí podle teplotního programu, jestliže ve studovaném vzorku neprobíhá žádný děj. Teplota zkoušeného vzorku začne zaostávat za teplotním programem (teplota referenčního vzorku), jestliže ve zkoumaném vzorku proběhne endotermický děj. Teploty musí být srovnány a z toho důvodu je do studovaného vzorku zvýšen přísun energie. Teplota analyzovaného vzorku než teplota referenčního vzorku je vyšší v případě, že ve studovaném vzorku probíhá exotermický děj. Poté je do zkoušeného vzorku přidáváno méně energie, aby byly vyrovnány teploty. K zachování stejné teploty obou vzorků vede kompenzace příkonu [27].
- DSC s tepelným tokem – umístění referenčního i zkoumaného (měřeného) vzorku je na samostatných teplotních činidlech, které jsou ve společné kalorimetrické cele. Měří se rozdíl teplot mezi analyzovaným a referenčním vzorkem. Mezi vzorky je tepelný most. Endotermní a exotermní děje způsobují ve vzorcích změny teplot. Rozdíl teplot je zaznamenán jako tepelný tok od vzorku od vzorku a je považován za úměrný rozdílu teplot [27].

Výsledné grafy z termické analýzy jsou uvedeny v příloze 3.

Faktory ovlivňující DSC

Obdobné faktory ovlivňují DSC (např. pecní atmosféra v okolí vzorku, geometrie vzorku). Před začátkem analýzy je potřeba zvážit, jaký materiál studuji, co v něm bude probíhat a jaký výsledek bude na DSC křivce, v rozmezí jakých teplot bude zkoušení probíhat a jestli je možné použít další termické analýzy. Základní problém termických analýz je kolerace mezi naměřenými a teplotnímu ději, které probíhají v měřeném vzorku.

3.8 Rentgenová fluorescenční spektrometrie (XRF)

Chemické složení všech druhů materiálů je zjišťováno pomocí analytické metody, která se nazývá rentgenová fluorescenční spektrometrie (XRF - X-Ray fluorescence Spectrometry). Tato metoda může analyzovat materiál ve formě prášku, kapaliny, pevného vzorku nebo filtrátu. Vedlejší použití je na zjištění povrchových vrstev a nátěrů, případně zjišťování tloušťky. Metoda má poměrně málo nároku na přípravu, je rychlá, přesná a nedestruktivní. Používá se v mnoha průmyslových odvětvích.

Energie ve formě rentgenového záření z rentgenové lampy působí při XRF analýze na zkoušený materiál. Místo rentgenového záření může působit také radioaktivní záření z radionuklidů. Charakteristické čáry vzorku jsou vybuzeny působícím zářením. Informaci o kvalitativním (vlnové délky resp. energie spektrálních čar) a kvantitativním (četnost fotonu resp. intenzita daných spektrálních čar) prvkovém složení vzorku podává právě vzniklé fluorescenční záření. Díky dualismu fluorescenčního záření jej lze zpracovávat dvěma způsoby.

Silná meziprvková ovlivnění vyžadující použití matričních referenčních materiálů pro kalibraci jsou nevýhodou použití XRF. Nároky na provoz spektrometrů a jejich pořizovací náklady jsou poměrně velké.

Dělení spektrometrů podle sekundárního záření:

- Vlnově disperzní spektrometry (WD XRF),
- Energodisperzní spektrometry (ED XRF).

Rentgenová fluorescenční spektrometrie byla využita při stanovení chemického složení všech zkušebních vzorků (betonů). Zahraniční normy [29,30], popisující stejné postupy stanovení chemického složení neznámých vzorků, byly touto metodou nahrazeny. Ve výsledcích je poté uvedeno srovnání české a zahraniční normy. Výsledné hodnoty XRF spektrometrie jsou uvedeny v příloze 3, tabulka P3/1a,b.

3.9 Stanovení hmotnosti složek betonu

Postup pro stanovení hmotnosti složek betonu jsem provedl dle normy ČSN 73 1323 [28]. Vzorky připravené dle 3.2 jsem navážil tak, aby každý vzorek měl cca 1 g. Norma udává přesnost $\pm 0,0002$ g, kterou jsem ovšem u většiny vzorků nesplnil. Na výsledky tato skutečnost nemá vliv. Navážené vzorky byly umístěny do 250 ml kádinky, do které bylo přidáno 100 ml demineralizované vody. Kádinka s vodou byla za stálého míchání postupně zahřívána do teploty 50 °C. Po dosažení této teploty byla kádinka umístěna na magnetickou míchačku (obr. 14), kde bylo zajištěno rovnoměrné míchání pomocí magnetického míchadla. Do kádinky jsem umístil teploměr a pH metr (obr. 14). Kontrolu správného měření pH metru jsem provedl před měřením tak, že pH metr byl umístěn do kontrolních vzorků o známém pH (obr. 15).



Obr. 16 – Magnetická míchačka s teploměrem; pH metr; zahřívání zkoušeného vzorku a měření pH



Obr. 17 – Kontrolní vzorky o známém pH

Teplota v kádince se stále udržovala na hodnotě 50 ± 5 °C. Zkušební vzorek byl míchán a z byrety jsem postupně přidával kyselinu chlorovodíkovou (1 + 19), dokud pH metr neukazoval hodnotu pH 1,0. Po tomto okamžiku byla teplota zvýšena na 70 ± 5 °C.

Následně po zahřátí jsem sledoval hodnotu pH. Pokud pH dosáhlo hodnoty vyšší než 1, snížil jsem ho opět přidáním HCl (1+19). Jestliže hodnota pH nebyla vyšší než 1,0 odstranil jsem kádinku z magnetické míchačky a nechal sedimentovat po dobu dvou minut. Následně byla zahájena filtrace (obr. 18) přes filtrační papír střední hustoty. Pomocí HCl (1+99) ve stříčce, jsem odstranil zbytek částic v kádince, aby všechen materiál byl filtrován. Zkušební vzorek byl filtrován pětkrát horkým 5% roztokem uhličitanu vápenatého (Na_2CO_3) a poté pětkrát studenou HCl (1+99). Každý vzorek betonu z různého prostředí byl filtrován dvakrát.



Obr. 18 – Filtrování

Nerozložený zbytek na filtru byl umístěn do vyžíhaného a zváženého kelímku (obr. 19). Kelímky jsem poté umístil do pece, kde byly vyžíhány na teplotu 1000 °C. Vyžíhány byly také vzorky, které nebyly rozkládány v kyselině (bez filtrování). Po vychladnutí byly zváženy. Výsledné hodnoty jsou uvedené v grafech, případně v příloze 2.



Obr. 19 – Kelímky se vzorky připravené na žíhání

Výpočet v kyselině nerozložitelného podílu:

$$\mu_{ac} = \frac{m_s}{m} \cdot 100 \quad (15)$$

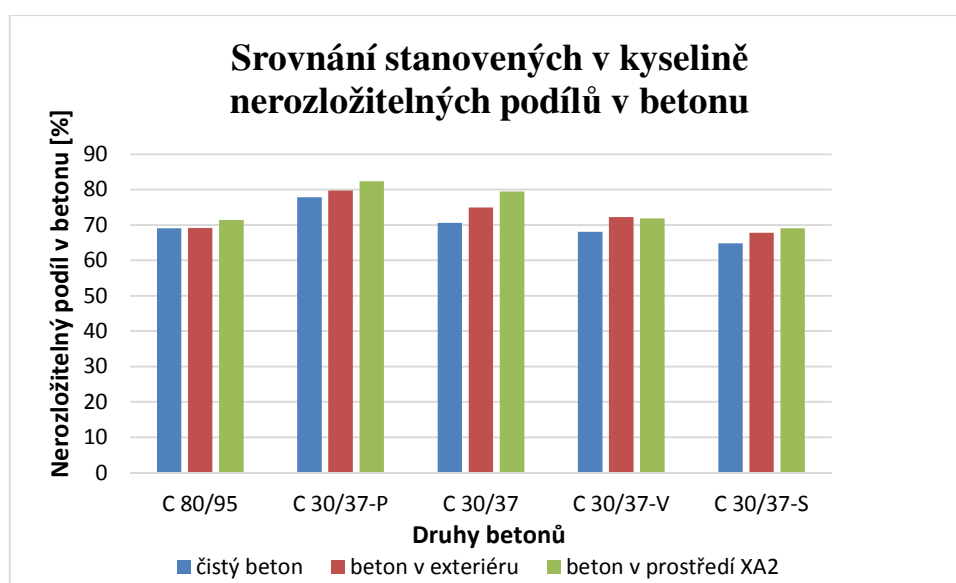
kde:

μ_{ac} - v kyselině nerozložitelný hmotnostní podíl vysušeného vzorku betonu [%],

m_s - hmotnost vyžíhaného kyselinou nerozložitelného podílu [g],

m - hmotnost vysušeného navážky [g].

Vypočítané hodnoty nerozložitelného podílu jsou uvedeny v příloze 2.



Graf č. 12 – Srovnání v kyselině nerozložitelných podílů

Výpočet hmotnostního podílu cementu:

$$\psi_{c,b} = \frac{98\mu_{r,b} - 99\mu_{ac,b}}{9406} \cdot 100 = 1,04\mu_{r,b} - 1,05\mu_{ac,b} \quad (16)$$

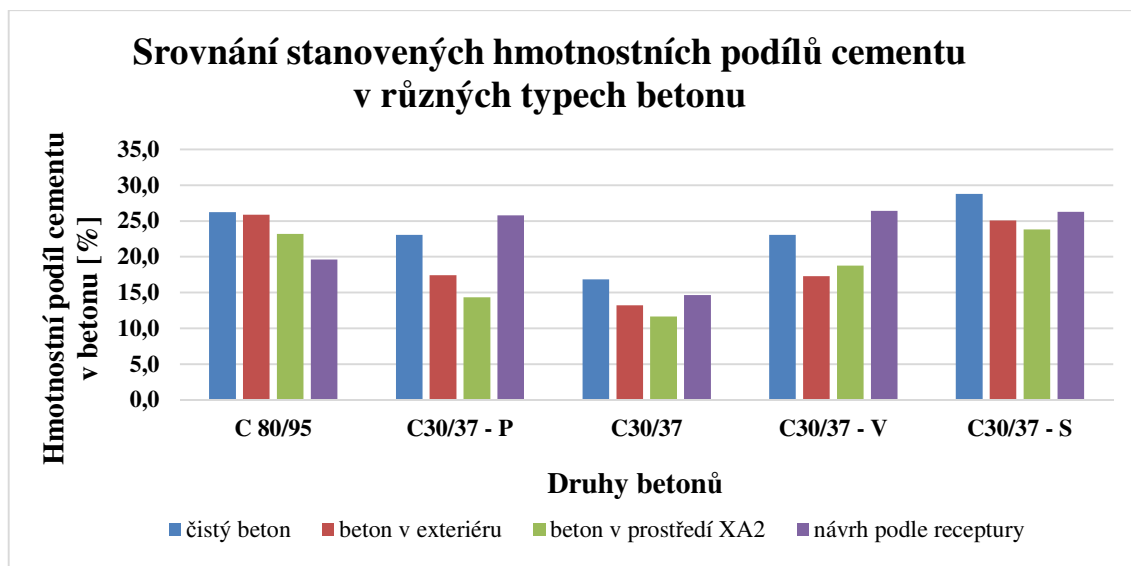
kde:

$\psi_{c,b}$ - hmotnostní podíl cementu [%],

$\mu_{ac,b}$ - v kyselině nerozložitelný hmotnostní podíl vysušeného vzorku betonu [g],

$\mu_{r,b}$ - hmotnostní podíl zbytku po žíhání vysušeného vzorku betonu [g].

Vypočítané hodnoty hmotnostního podílu cementu jsou uvedené v příloze P2.



Graf č. 13 – Srovnání hmotnostních podílů cementu v betonu

Výpočet hmotnostního podílu kameniva:

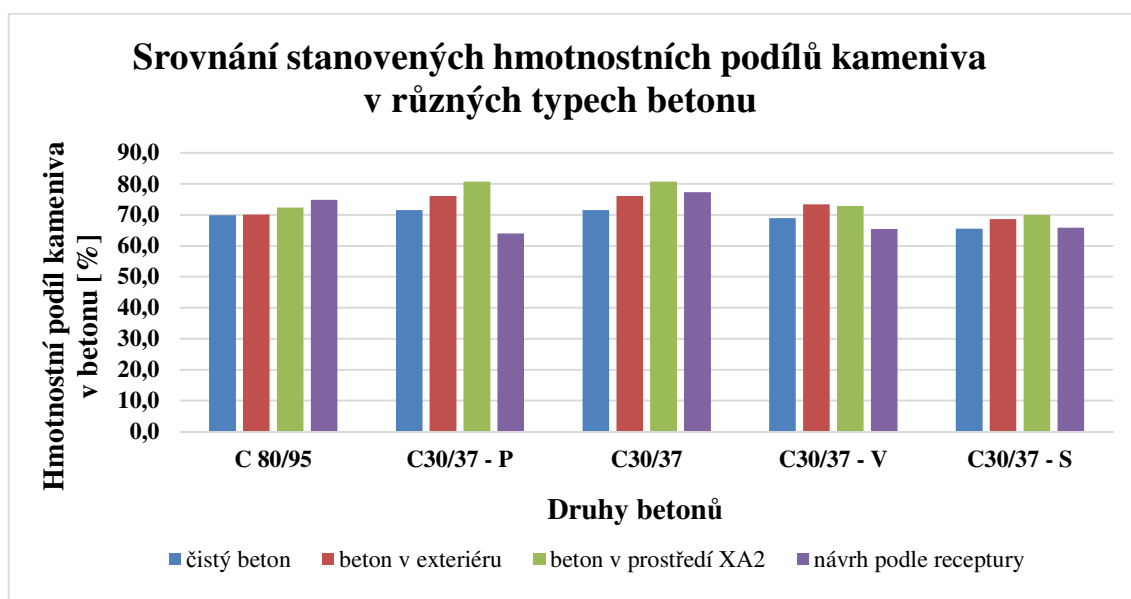
$$\psi_{gr,b} = \frac{98\mu_{ac,b} - 2\mu_{r,b}}{9406} \cdot 100 = 1,04\mu_{ac,b} - 0,02\mu_{r,b} \quad (17)$$

kde:

$\psi_{gr,b}$ - hmotnostní podíl kameniva [%],

$\mu_{ac,b}$ - v kyselině nerozložitelný hmotnostní podíl vysušeného vzorku betonu [g],

$\mu_{r,b}$ - hmotnostní podíl zbytku po žíhání vysušeného vzorku betonu [g].



Graf č. 14 – Srovnání hmotnostních podílů kameniva v betonu

Hmotnostní koncentrace cementu:

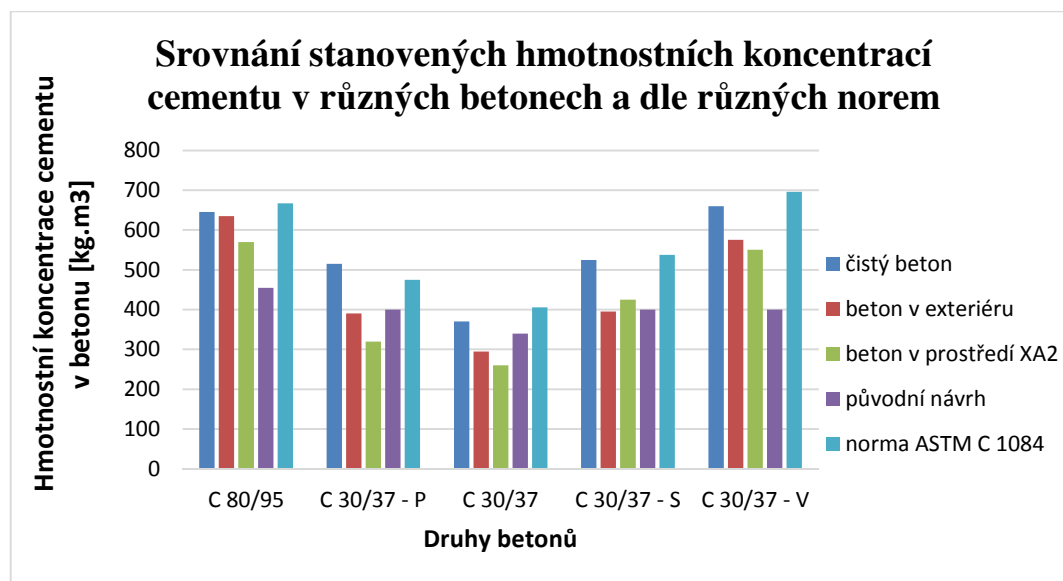
$$C_{c,b} = \frac{\psi_{c,b} \cdot \rho_b}{100} \quad (18)$$

kde:

$C_{c,b}$ - hmotnostní koncentrace cementu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

$\psi_{ac,b}$ - hmotnostní podíl cementu [%],

ρ_b - objemová hmotnost vzorku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].



Graf č. 15 – Srovnání hmotnostních koncentrací cementu v betonu

Hmotnostní koncentrace kameniva:

$$C_{gr,b} = \frac{\psi_{gr,b} \cdot \rho_b}{100} \quad (19)$$

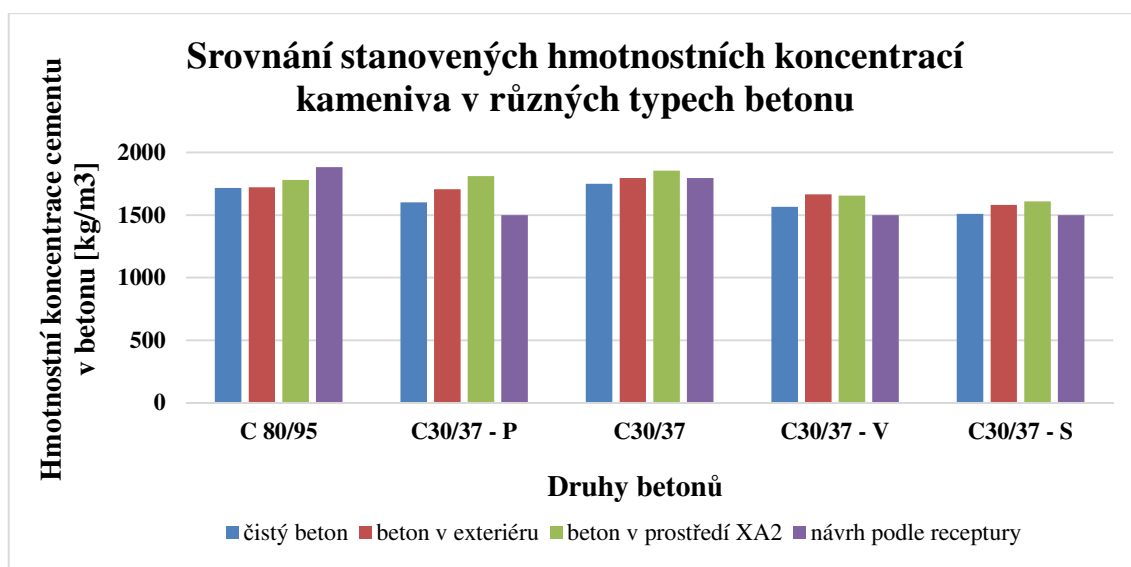
kde:

$C_{c,b}$ - hmotnostní koncentrace cementu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

$\psi_{gr,b}$ - hmotnostní podíl kameniva [%],

ρ_b - objemová hmotnost vzorku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Vypočítané hodnoty hmotnostní koncentrace cementu a kameniva jsou uvedené v příloze P2.



Graf č. 16 – Srovnání hmotnostních koncentrací kameniva v betonu

3.10 Zahraniční normy

Zahraniční normy [29,30] svým postupem stanovují množství (obsah) cementu v betonu. Postup je odlišný od postupu, který je uveden v české normě [28]. Výsledky získané při použití české normy, jsem využil ke stanovení obsahu cementu v betonu podle zahraniční normy. Výsledky byly porovnány.

Postup stanovení obsahu cementu v betonu dle [29,30]

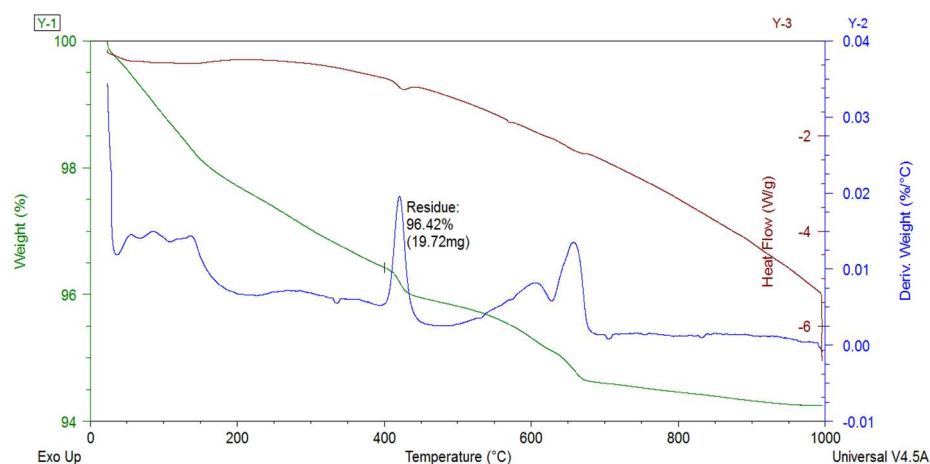
1. Stanovení kombinované vody

$$L_c = \frac{(C-D) \cdot 100}{C} \quad (20)$$

kde:

- L_c - procento kombinované vody [%],
- C - hmotnost suchého vzorku [g],
- D - hmotnost vzorku po dosáhnutí teploty 520 °C [g].

Hmotnost vzorku při teplotě 520 °C jsem si upravil. Množství vzorku jsem stanovoval při teplotě 400 °C. Tato teplota byla zvolena úmyslně, dokud neproběhne rozklad portlanditu, který nastává při teplotě cca 450 °C. Hmotnost vzorku byla odečtena z grafu termické analýzy (obr. 17). Hodnoty zjištěné tímto postupem jsou uvedené v tabulce č. 24.



Obr. 20 – Procentuální hmotnostní zbytek při teplotě 400°C

Tabulka č. 24 – Výpočet kombinované vody (vázané vody)

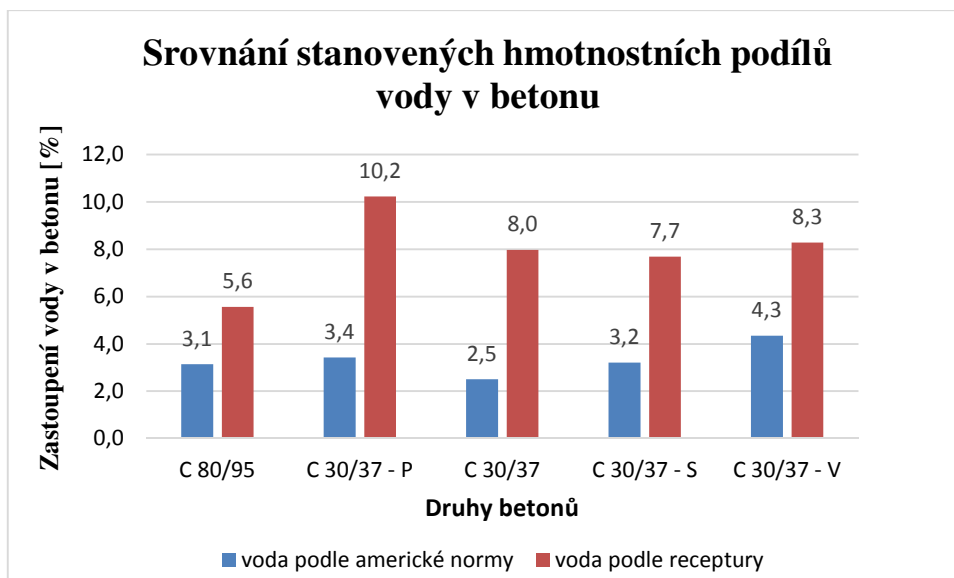
Označení vzorků		hmotnosti při 400°C	hmotnost C	úbytek hmotnosti do 400°C	hmotnost D	Lc
		%	g	g	g	%
čistý beton	C 80/95	96,42	1,0022	0,0359	0,9663	3,58
	C 30/37-P	95,51	1,0016	0,0450	0,9566	4,49
	C 30/37	96,94	1,0006	0,0306	0,9699	3,06
	C 30/37-S	95,62	1,0028	0,0439	0,9588	4,38
	C 30/37-V	93,94	1,0036	0,0608	0,9427	6,06
beton v exteriéru	C 80/95	97,35	1,0021	0,0266	0,9755	2,65
	C 30/37-P	97,09	1,0015	0,0291	0,9723	2,91
	C 30/37	97,83	1,0018	0,0217	0,9800	2,17
	C 30/37-S	97,44	1,0007	0,0256	0,9750	2,56
	C 30/37-V	96,83	1,0009	0,0317	0,9692	3,17
beton v prostředí XA2	C 80/95	96,79	1,0009	0,0321	0,9688	3,21
	C 30/37-P	97,13	1,0013	0,0287	0,9725	2,87
	C 30/37	97,72	1,0018	0,0228	0,9789	2,28
	C 30/37-S	97,30	1,0018	0,0270	0,9748	2,70
	C 30/37-V	96,19	1,0018	0,0382	0,9636	3,81

kde:

C - hmotnost suchého vzorku [g],

D - hmotnost vzorku při 400°C [g],

Lc - procento kombinované vody [%].



Graf č. 17 – Srovnání stanovených hmotnostních podílů vody v betonu

2. Stanovení nerozpustného (nerozložitelného) zbytku:

$$R = \frac{(F-G) \cdot 100}{E} \quad (21)$$

kde:

- R - nerozložitelný zbytek vzorku [%],
- F - společná hmotnost nerozložitelného zbytku, filtračního papíru a Fuler. jílu [g],
- E - hmotnost použitého vzorku [g],
- G - společný zbytek filtračního papíru a Fuler. jílu [g].

Postup stanovení nerozložitelného podílu je podle normy ASTM C 1084 – 02 [30] mírně odlišný. Výsledné hodnoty by však měly odpovídat výsledkům dle české normy. Hodnotu R jsem použil z české normy [28].

3. Stanovení objemové hmotnosti suchého a nasyceného vzorku

a) nasycený vzorek

$$D_{SSD} = \frac{W_1 \cdot \rho}{W_1 - W_2} \quad (22)$$

kde:

- D_{SSD} - objemová hmotnost nasyceného vzorku [kg/m^3],
- W_1 - hmotnost nasyceného vzorku váženého na vzduchu [kg],
- W_2 - hmotnost vzorku váženého ve vodě [kg],
- ρ - hustota vody [kg/m^3].

b) vysušený vzorek

$$D_{dry} = \frac{D_{SSD} \cdot W_3}{W_1} \quad (23)$$

kde:

D_{SSD} - objemová hmotnost nasyceného vzorku [kg/m^3],

W_1 - hmotnost nasyceného vzorku váženého na vzduchu [kg],

W_3 - hmotnost vysušeného vzorku [kg].

Výsledné hodnoty objemových hmotností jsou uvedeny v tabulce č. 25 a jsou porovnány s hodnotami objemových hmotností dle české normy. Hodnoty objemových hmotností nasyceného vzorku podle zahraniční normy jsou v průměru o 1,3% vyšší než podle normy české. Hodnoty objemových hmotností suchých vzorků se liší také o 1,3%.

4. Stanovení obsahu cementu

$$Cement\ content = \frac{C \cdot D_1}{100} \quad (24)$$

kde:

C - stanovení procentuálního zastoupení CaO , SiO_2 [%],

D_1 - D_{dry} [kg/m^3].

Srovnání obsahu cementu je zobrazeno na grafu č. 15.

Obsah je zjišťován jako poměr obsahu daného oxidu v betonu k obsahu oxidu v cementu.

$$C = C_S + C_C$$

C_S – stanovení SiO_2

C_C – stanovení CaO

$$\frac{\text{SiO}_2 \text{ v betonu}}{\text{SiO}_2 \text{ v cementu}}$$

$$\frac{\text{CaO v betonu}}{\text{CaO v cementu}}$$

Jestliže hodnoty SiO_2 a CaO v cementu nejsou známy, jsou v normě [30] uvedené průměrné hodnoty pro další výpočet, $\text{SiO}_2 = 21\%$ a $\text{CaO} = 63,5\%$. Předpokládána

hodnota CaO v kamenivu je max. 1%, a proto lze vliv kameniva zanedbat. Nebylo použito kamenivo s příměsí vápence nebo vápenatých minerálů. Do výpočtu byla použita hodnota CaO stanovená ze spektrální a termální analýzy.

Hodnota SiO₂ v betonu je neznámá, a proto jsem použil hodnotu danou normou, tedy 21%.

Výpočet obsahu cementu je uveden v tabulce č. 25.

Tabulka č. 25 – Výpočet obsahu cementu dle ASTM C 1084-02 [30]

Označení vzorků		R	hmotnost m ₁	hmotnost m ₂	D _{SSD}	D _{dry}	CaO	SiO ₂ bet/SiO ₂ cem.	Cement content
		%	g	g	kg.m ⁻³	kg.m ⁻³	%	%	kg.m ⁻³
čistý beton	C 80/95	69,06	2464	2501	2510	2473	22,90	2,94	639
	C 30/37-P	77,82	2230	2317	2340	2252	17,22	3,01	456
	C 30/37	70,61	2235	2347	2350	2237	13,80	3,11	378
	C 30/37-S	68,05	2292	2394	2380	2279	23,07	2,81	590
	C 30/37-V	64,79	2271	2343	2390	2317	32,63	2,40	812
beton v exteriéru	C 80/95	69,20	2464	2501	2510	2473	23,55	2,43	642
	C 30/37-P	79,72	2230	2317	2340	2252	18,03	2,49	462
	C 30/37	74,98	2235	2347	2350	2237	15,11	2,94	404
	C 30/37-S	72,27	2292	2394	2380	2279	18,90	2,32	484
	C 30/37-V	67,81	2271	2343	2390	2317	23,31	2,34	594
beton v prostředí XA2	C 80/95	71,43	2464	2501	2510	2473	26,42	2,62	718
	C 30/37-P	82,33	2230	2317	2340	2252	19,94	2,56	507
	C 30/37	79,44	2235	2347	2350	2237	16,56	2,86	434
	C 30/37-S	71,85	2292	2394	2380	2279	21,07	2,58	539
	C 30/37-V	69,08	2271	2343	2390	2317	27,05	2,36	681

kde:

R - nerozložitelný podíl [%],

D_{SSD} - objemová hmotnost nasyceného vzorku [kg/m³],

D_{dry}- objemová hmotnost suchého vzorku [kg/m³].

CaO- stanovená hodnota CaO z termických analýz [%],

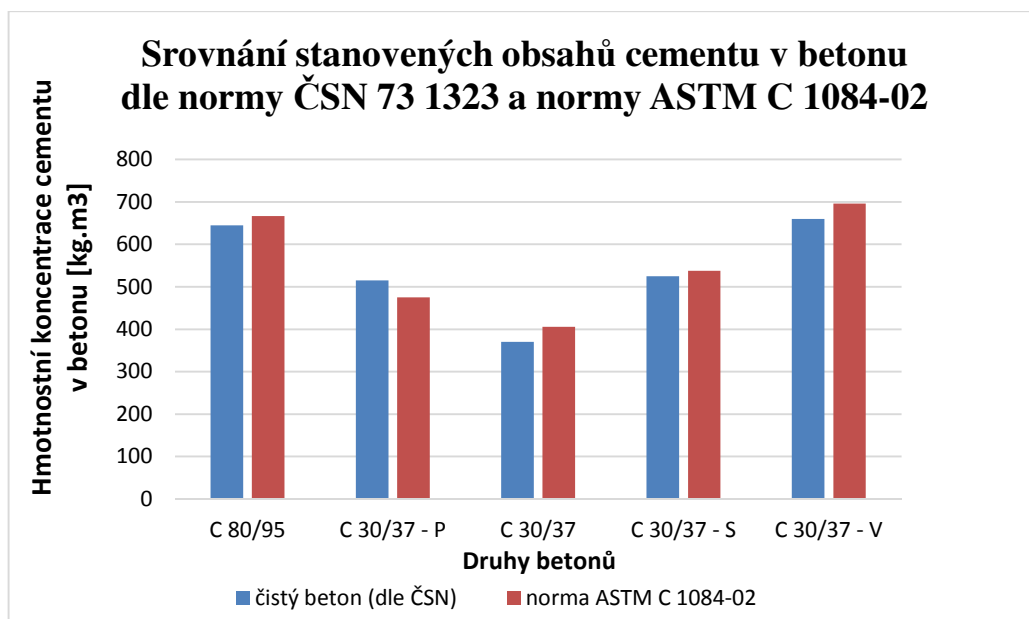
SiO₂- poměr SiO₂ v betonu a cementu [%],

m₁ - hmotnost suchého vzorku [g],

m₂ - hmotnost nasyceného vzorku [g].

Stanovením hmotnostního obsahu cementu (pojiva) v betonu nejsem schopen určit přesnou hodnotu obsahu cementu a případně přísad a příměsí (popílek, struska, vápenec, metakaolin) v betonu podle uvedeného postupu. Vyšší hodnoty obsahu cementu jsou způsobeny přítomností příměsí v betonu.

Srovnání obsahu cementu podle normy ČSN 73 1323 a normy ASTM C 114 – 02 je uvedeno v grafu č. 18. Norma [30] pracuje s objemovou hmotností suchého a nasyceného betonu. Objemové hmotnosti betonu jsem stanovoval pouze na čistém (laboratorním) betonu (kap. 3.3), betony do ostatních prostředí byly umístěny až po rozdrčení v čelistovém drtiči (kap. 3.6), a proto nemohla být stanovena objemová hmotnost v daném prostředí. Z tohoto důvodu je srovnání obsahu cementu pouze mezi normou ASTM C 1084 [30] a čistým betonem dle normy ČSN 73 1323 [28].



Graf č. 18 – Srovnání obsahu cementu v betonu podle různých norem

3.11 Výpočet CaO v betonu

Termické analýzy byly prováděny na všech druzích betonu. Beton byl umístěn v laboratorním prostředí, exteriéru a v kyselině sírové (aplikace prostředí XA2). Z grafu termických analýz mě zajímala oblast rozkladu portlanditu Ca(OH)_2 - teplota cca 400°C a CaCO_3 – cca 650°C.

Reakce rozkladu portlanditu:



Reakce rozkladu CaCO_3 :



Z uvedených rovnic reakcí byl vypočítán obsah CaO v betonu (tabulka č. 26).

Tabulka č. 26 – Výpočet hodnoty CaO v betonu

Hodnoty z grafu termické analýzy			Výpočet							
Označení betonu	hmotnost m_1	hmotnost m_2	hmotnost Ca(OH)_2	hmotnost CaCO_3	Ca v Ca(OH)_2	Ca v CaCO_3	Součet Ca	Ca z XRFS	Rozdíl Ca	Výsledná hodnota CaO v betonu
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
C80/95	0,55	0,49	2,26	1,11	1,22	0,44	1,66	13,35	11,69	16,36
C30/37 - P	0,77	1,58	3,17	3,60	1,71	1,44	3,15	11,94	8,79	12,30
C30/37	0,72	1,54	2,97	3,50	1,61	1,40	3,01	10,05	7,04	9,86
C30/37 -V	1,03	5,83	4,25	13,25	2,30	5,30	7,59	19,36	11,77	16,48
C30/37 - S	1,01	1,34	4,16	3,04	2,24	1,22	3,46	20,11	16,65	23,31
C 80/95-EXT	0,22	1,69	0,90	3,84	0,48	1,54	2,02	14,04	12,02	16,82
C 30/37 P-EXT	0,25	3,19	1,05	7,24	0,57	2,90	3,46	12,66	9,20	12,88
C 30/37-EXT	0,16	3,57	0,64	8,12	0,34	3,25	3,59	11,30	7,71	10,79
C 30/37 V-EXT	0,21	6,75	0,86	15,35	0,47	6,14	6,60	16,25	9,65	13,50
C 30/37 S-EXT	0,34	3,01	1,39	6,83	0,75	2,73	3,48	15,38	11,90	16,65
C 80/95-XAII	0,20	0,90	0,84	2,05	0,45	0,82	1,28	14,75	13,48	18,87
C 30/37 P-XAII	0,24	1,64	1,00	3,74	0,54	1,49	2,04	12,21	10,17	14,24
C 30/37-XAII	0,31	2,29	1,29	5,20	0,69	2,08	2,77	11,22	8,45	11,83
C 30/37 V-XAII	0,39	5,52	1,61	12,53	0,87	5,01	5,89	16,63	10,75	15,05
C 30/37 S-XAII	0,49	1,80	2,02	4,08	1,09	1,63	2,72	16,52	13,80	19,32

kde:

m_1 - hmotnost H_2O při rozkladu Ca(OH)_2 [%],

m_2 - hmotnost CO_2 při rozkladu CaCO_3 [%],

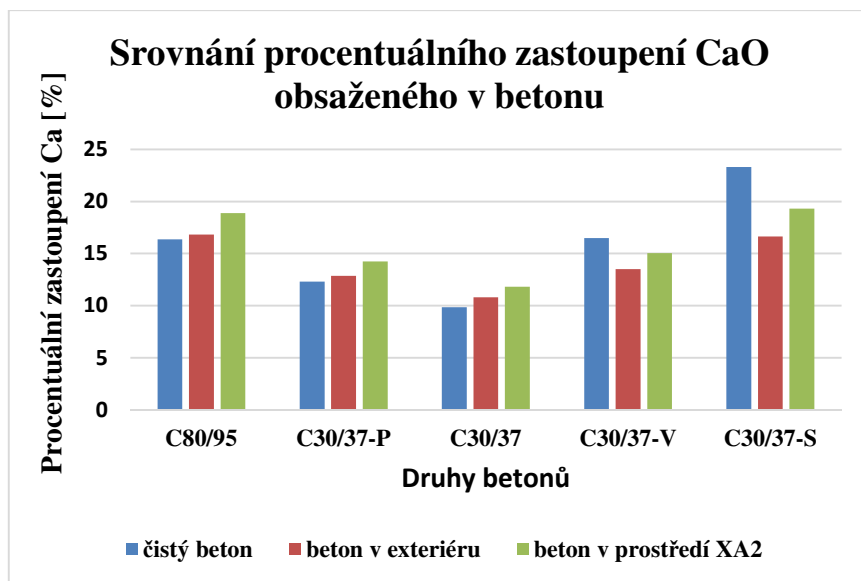
Pozn:

Součet Ca - součet hodnot Ca obsaženého v Ca(OH)_2 a v CaCO_3

Rozdíl Ca - je rozdíl hodnot naměřených ve spektrometru a termické analýze

Označení betonu EXT = beton umístěný v exteriéru

Označení betonu XA2 = beton v prostředí kyseliny



Graf č. 19 – Srovnání procentuálního zastoupení CaO v betonu

4. Závěr

Zpracovaná diplomová práce popisuje v teoretické části beton. Je popisována jeho klasifikace dle různých parametrů a podle příslušných norem. Dále jsou popisovány hlavní složky pro výrobu betonu, jako jsou kamenivo, cement, voda, přísady a příměsi.

Experimentální část této práce byla řešena z hlediska analýzy betonu podle jeho vstupních složek. Tato metodika byla prováděna podle normy ČSN 73 1323 [28]. Norma ASTM C 1084-02 [30] sloužila pouze jako porovnání, o kolik se výsledky liší s českou normou.

Podle přiložených výsledků se hodnoty obsahu cementu podle ASTM C 1084-02 liší o cca 2,2% oproti české normě. Největší rozdíly jsou v betonu s příměsí popílku a klasického betonu C 30/37. Pro stanovení reprezentativních výsledků bylo namícháno více záměsí, aby mohl být sledován vliv obsahu příměsí a různého složení. Z uvedených výsledků je zřejmé, že nejvyšší objemovou hmotnost má vysokopevnostní beton C 80/95. Tento beton měl nízký vodní součinitel, který nejvíce ovlivnil vyšší hutnost a tím také objemovou hmotnost. Použité kamenivo (čedič) mělo také vliv na vyšší objemovou hmotnost.

Umístění betonu do vnějšího (EXT.) a korozivního síranového (XA2) prostředí výrazně ovlivnilo stanovené množství cementu. Beton umístěný v korozivním síranovém prostředí měl nejvyšší procento stanoveného v kyselině nerozložitelného podílu. Prostředí XA2 nejlépe odolával beton s příměsí popílku, naopak nejméně vysokopevnostní beton a beton s příměsí strusky. Stanovený hmotnostní podíl cementu v betonu s popílkem v prostředí XA2 byl výrazně menší oproti původnímu návrhu. Nejvyšší stanovený obsah cementu v betonu byl zjištěn u betonů, které byly umístěny v „chráněném“ prostředí laboratoře, kde na ně pravděpodobně působilo méně vlivů, než u jiných prostředí. Zvýšené obsahy cementu v betonu oproti původnímu návrhu jsou pravděpodobně způsobeny vlivy, jako je pórovitost a obsah vody, které nejsou zcela zahrnuty v postupech pro stanovení jeho obsahu. Použitá analýza neumí rozlišit obsah cementu na množství cementu a příměsí a vše je zahrnuto v jedné hodnotě.

Výsledná hodnota CaO v betonu je při porovnání nejvyšší u betonu v prostředí XA2, následuje beton v exteriéru a nejnižší hodnota je v čistém (laboratorním) betonu. Hodnoty SiO₂ z výsledků XRF spektrometrie (příloha 3) jsou vyšší, jelikož bylo použito převážně křemičité kamenivo.

5. Seznam použitých zdrojů informací

- [1] SVOBODA, L. A KOL, *Stavební hmoty*, 3. vydání, Praha: JAGA, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2, dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodas/sh/>
- [2] ČSN EN 206: *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [3] ČSN EN 12350-2: *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [4] ČSN EN 12350-3: *Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška Vebe*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [5] ČSN EN 12350-4: *Zkoušení čerstvého betonu – Část 4: Stupeň zhutnitelnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [6] ČSN EN 12350-5: *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [7] ČSN EN 197-1 ed. 2: *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [8] ČSN EN 934-2 + A1: *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Definice, požadavky, shoda, značení a označování štítky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [9] ČSN EN 1008: *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [10] PYTLÍK, P. *Technologie betonu*, Brno: VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1647-5
- [11] ČSN EN 12620+A1: *Kamenivo do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [12] JIRÁSEK, J., VAVRO, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3

- [13] <http://www.transbeton.com/o-betonu/technologicky-slovník/pevnost-betonu> [online]. 2015 [cit. 2015-06-21]. dostupné z <http://www.transbeton.com>
- [14] <http://www.keramzit.cz/> [online]. 2015 [cit. 2015-11-22]. dostupné z <http://www.keramzit.cz/>
- [15] http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska_c.2.pdf [online]. 2011 [cit. 2015-11-19].
- [16] ADÁMEK, J., NOVOTNÝ, B., KOUKAL, J.: *Stavební materiály*, Brno: CERM, 1997, ISBN: 80-214-0631-3
- [17] FEČKO, P., KUŠNIEROVÁ, M., LYČKOVÁ, B., ČABLÍK, V., FARKAŠOVÁ, A.: *Popílky*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0327-5.
- [18] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ, P.; *Lehké stavební látky: Vysoké učení technické v Brně*, 1993, ISBN 80-214-0514-7
- [19] Pticen, F., Vavro, M., Nožička, T., Šustek, P., Boháčová, J., Bujdoš, D.: *Metakaolíny připravené z kaolínů s odlišným mineralogickým a zrnitostním složením*, VUT Brno, 2010, ISBN: 978-80-214-464-7
- [20] OPRAVILOVÁ, L., STANĚK, T., KUBÁTOVÁ, D., VŠIANSKÝ, D.; *Vliv přísady alternativních surovin na užitné vlastnosti cementových kompozitů*, Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2009, ISBN: 978-80-254-4447-4
- [21] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [22] <http://www.radynacestu.cz/magazin/pantheon-rim/> [online]. 2015 [cit. 2015-11-24]. dostupné z <http://www.radynacestu.cz>
- [23] http://www.yildiz.edu.tr/~zcgirgin/RC_lecture_notes/RChistory.html [online]. 2015 [cit. 2015-11-20]. dostupné z <http://yildiz.edu.tr>
- [24] http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_termicka_analyza/index.htm, [online], 2015 [cit. 2015-11-24]. dostupné z <http://old.vscht.cz>
- [25] LITOŠ, J., Experimentální metody, <http://ecentrum.fsv.cvut.cz> (15.12. 2007)

- [26] VANIČEK, J., *Metody termické analýzy, katedra textilních materiálů*, TF, TU Liberec, 2007, dostupné z <http://www.ft.vslib.cz>
- [27] <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf> [online], 2012 [cit. 2015-11-20]. dostupné z <http://tresen.vscht.cz>
- [28] ČSN 73 1323: *Stanovenie hmotnosti zložiek betónu*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1989.
- [29] ASTM C114 - 04. *Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement*, West Conshohocken USA: ASTM International, 2011
- [30] ASTM C1084 - 02. *Standard test method for portland-cement content of hardened hydraulic-cement concrete*, West Conshohocken USA: ASTM International, 2011
- [31] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [32] BLAŽEK, A.: *Termická analýza*, Praha: SNTL, 1974, 296 s.

6. Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat panu Ing. Pavlu Mecovi za ochotu, cenné rady a připomínky při sestavování mé diplomové práce. Ing. Martině Turicové děkuji za provedenou analýzu zkušebních vzorků. Laboratoři stavebních hmot VŠB-TUO chci poděkovat za poskytnutí prostor při provádění mé diplomové práce a Národnímu programu udržitelnosti č. LO1406 za možnost provedení termální analýzy.

Seznam obrázků

Obr. 1	Kopule římského Pantheonu
Obr. 2	Vyztužené květináče J. Moniéra, vyztužený člun J. L. Lambota
Obr. 3	Pórovité kamenivo – Keramzit
Obr. 4	Těžba hutného kameniva – z vody, clonovým odstřelem
Obr. 5	Těžké kamenivo – Baryt
Obr. 6	Betonové zkušební krychle
Obr. 7	Stanovení objemové hmotnosti metodou vážení nasyceného vzorku
Obr. 8	Měřicí přístroj TICO
Obr. 9	Zkouška pevnosti v tlaku
Obr. 10	Čelistový drtič; beton, který byl rozdrcen v drtiči
Obr. 11	Laboratorní mlýn; beton po rozemletí v mlýnu
Obr. 12	Uložení betonu do vnějšího a do korozivního síranového prostředí
Obr. 13	Diferenční kalorimetr SDT Q600
Obr. 14	Druhy termogravimetrické křivky
Obr. 15	Popis zlomu na křivce TG
Obr. 16	Magnetická míchačka s teploměrem, pH metr, zahřívání zkoušeného vzorku a měření pH
Obr. 17	Kontrolní vzorky o známém pH
Obr. 18	Filtrování
Obr. 19	Kelímky se vzorky připravené na žíhání
Obr. 20	Procentuální hmotnostní zbytek při teplotě 400°C

Seznam tabulek

Tabulka č. 1	Klasifikace podle sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2
Tabulka č. 2	Klasifikace podle Vebe dle ČSN 12350-3
Tabulka č. 3	Klasifikace podle zhutnitelnosti dle ČSN EN 12350-4
Tabulka č. 4	Klasifikace podle rozlití dle ČSN 12350-5
Tabulka č. 5	Klasifikace betonu dle stupně vlivu prostředí
Tabulka č. 6	Třídy pevnosti v tlaku obyčejného, těžkého a lehkého betonu
Tabulka č. 7	Klasifikace lehkého betonu podle objemové hmotnosti
Tabulka č. 8	Požadavky na zrnitost kameniva dle normy ČSN EN 12620
Tabulka č. 9	Druhy hornin pro obyčejné betony
Tabulka č. 10	Přehled mineralogického a chemického složení vybraných hornin použitých do betonů
Tabulka č. 11	Specifická absorpce záření některých kameniv
Tabulka č. 12	Druhy cementů a jejich složení podle ČSN EN 197-1
Tabulka č. 13	Kritéria pro hodnocení záměsové vody
Tabulka č. 14	Základní požadavky na popílek do betonu
Tabulka č. 15	Chemické složení vysokopecní strusky
Tabulka č. 16	Chemické vlastnosti a míra rozlití metakaolinu (typické hodnoty)
Tabulka č. 17	Chemické složení mikromletého vápence
Tabulka č. 18	Sítový rozbor mikromletého vápence
Tabulka č. 19	Navržená receptura betonu C 80/95
Tabulka č. 20	Navržená receptura betonu C 30/37 – s příměsí popílku
Tabulka č. 21	Navržená receptura betonu C 30/37
Tabulka č. 22	Navržená receptura betonu C 30/37 – s příměsí vápence
Tabulka č. 23	Navržená receptura betonu C 30/37 – s příměsí strusky
Tabulka č. 24	Výpočet kombinované vody (vázané vody)
Tabulka č. 25	Výpočet obsahu cementu dle ASTM C 1084-02
Tabulka č. 26	Výpočet hodnoty CaO v betonu

Seznam grafů

Graf č. 1	Využití popílku ve stavebnictví
Graf č. 2	Stanovení geometrické objemové hmotnosti
Graf č. 3	Objemová hmotnost metodou vážení nasyceného vzorku
Graf č. 4	Hustota betonu stanovená pomocí pyknometru
Graf č. 5	Srovnání objemových hmotností zjištěných pomocí různých postupů
Graf č. 6	Srovnání zdánlivých pórovitostí betonů
Graf č. 7	Skutečná pórovitost betonů
Graf č. 8	Nasákavost betonů
Graf č. 9	Srovnání zdánlivé a skutečné pórovitosti betonů
Graf č. 10	Srovnání výsledků ultrazvukové impulzové metody na různých betonech
Graf č. 11	Pevnost v tlaku zkoušených betonů
Graf č. 12	Srovnání v kyselině nerozložitelných podílů
Graf č. 13	Srovnání hmotnostních podílů cementu v betonu
Graf č. 14	Srovnání hmotnostních podílů kameniva v betonu
Graf č. 15	Srovnání hmotnostních koncentrací cementu v betonu
Graf č. 16	Srovnání hmotnostních koncentrací kameniva v betonu
Graf č. 17	Srovnání stanovených hmotnostních podílů vody v betonu
Graf č. 18	Srovnání obsahu cementu v betonu podle různých norem
Graf č. 19	Srovnání procentuálního zastoupení CaO v betonu